

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TRABAJO DE GRADUACIÓN ESTRUCTURADO DE MANERA INDEPENDIENTE PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

TEMA:

COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA

AUTORA: MILLÁN CASTILLO MARÍA FERNANDA

TUTOR: M.S.C ING. SANTIAGO MEDINA

Ambato - Ecuador

2013

PÁGINA DE APROBACIÓN POR EL TUTOR

Certifico que la presente tesis de grado fue realizada por la Srta. María Fernanda Millán Castillo, egresada de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, se desarrolló bajo mi dirección, es un trabajo estructurado de manera independiente, personal e inédito y ha sido concluido bajo el título "COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA".

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad.

Ambato, Septiembre de 2013.

Ing. M.S.c. Santiago Medina

TUTOR DE TESIS

PÁGINA DE AUTORÍA DE LA TESIS

Yo, María Fernanda Millán Castillo, con C.I. 180460640-6, tengo a bien indicar que los criterios emitidos en el trabajo de graduación "COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA" como también los contenidos presentados, las ideas, análisis, síntesis son de exclusiva responsabilidad de mi persona en calidad de autor de este trabajo investigativo.

Ambato, Septiembre de 2013.

María Fernanda Millán Castillo

AUTOR

APROBACIÓN PROFESORES CALIFICADORES

Los suscritos Profesores Calificadores, una vez revisado, aprueban el informe de Investigación, sobre el tema: "COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA", de la Srta. Egresada María Fernanda Millán Castillo, de la carrera de Ingeniería Civil, el mismo que guarda conformidad con las disposiciones reglamentarias emitidas por el Centro de Estudios de Pregrado de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

Ambato, Septiembre de 2013

Para constancia firman.

....

Ing. M.S.c. Lorena Pérez

PROFESOR CALIFICADOR

....

Ing. M.S.c. Carlos Navarro

PROFESOR CALIFICADOR

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mis padres por ser el pilar fundamental en mi vida y porque siempre han estado junto a mí en cada etapa de mi existencia, a ellos eternamente mi respeto y admiración por todo el amor que me han brindado y por todos los sacrificios que día a día han hecho por verme alcanzar esta meta.

María Fernanda

AGRADECIMIENTO

Agradezco infinitamente a mi Padre Celestial por la salud y por todas las bendiciones que me ha dado, y por permitirme culminar mi carrera.

Gracias a mis padres Orlando y María Elena, por siempre apoyarme en mis buenas y malas decisiones y sobre todo por perdonar mis errores, por enseñarme a ser constante y fomentar en mí el sentido de la responsabilidad.

Gracias a mi hermano Oscar, por sus enseñanzas durante mi vida estudiantil, por sus consejos y palabras de aliento que me impulsan a ser una mejor persona, y por siempre hacerse presente con sus palabras “como va la tesis”, gracias ñaño has sido un gran apoyo.

Mi profundo y sincero agradecimiento a Jorge Luis, amigo, compañero y amor de mi vida, por su ternura, paciencia, y por todo el apoyo incondicional que me ha brindado para desarrollar este trabajo, por secar mis lagrimas y siempre tener las palabras exactas para consolarme, gracias amor por no dejarme caer en aquellos momentos de debilidad y enseñarme a luchar por mis metas.

Gracias al Ing. Santiago Medina por su tutoría y paciencia, gracias también por compartir sus conocimientos técnicos de manera desinteresada.

María Fernanda

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

A. PÁGINAS PRELIMINARES

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO VI

PROPUESTA

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE GRÁFICOS

RESUMEN EJECUTIVO

TEMA: "COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA"

AUTOR: Millán Castillo María Fernanda
TUTOR: Ing. M.S.c. Santiago Medina
FECHA: Agosto 2013

Para el desarrollo de esta investigación se analizó la calidad de los agregados de las principales canteras que abastecen de material pétreo en la construcción de las diferentes obras civiles al cantón y provincia. De donde se determinó la cantera con el agregado (grueso y fino) más crítico para posteriormente seleccionar las características de las fibras de polipropileno que se utilizaron como refuerzo en el hormigón de acuerdo a las recomendaciones dadas por las normas ASTM C 1116 y ACI 544.2R.

Posteriormente se realizó la dosificación del hormigón utilizando el método desarrollado por la Universidad Central del Ecuador, para resistencias de f'c=210 kg/cm2 y f'c=240 kg/cm2, con un asentamiento de 6 a 9 cm debido a que es el tipo de hormigón más utilizado en el medio de la construcción.

A partir de estas dosificaciones se tomaron muestras de cilindros y vigas con distintas concentraciones de fibra de polipropileno, realizando además un hormigón patrón de referencia (sin fibra) con el objeto de compararlo con el hormigón reforzado con fibra.

Con el propósito de conocer el comportamiento del hormigón reforzado con fibras de polipropileno se realizaron diferentes ensayos de laboratorio en donde se analizó cada una de sus propiedades mecánicas tanto en estado fresco como en estado endurecido.

Finalmente se determinó el porcentaje óptimo de fibra de polipropileno que debe adicionarse al hormigón, contribuyendo así a mejorar sus características y propiedades mecánicas dentro los cuales se destacan la resistencia a la compresión, tracción y flexión dando como resultado un hormigón mucho más dúctil, apto para su utilización en las diferentes obras de ingeniería civil.

B. TEXTO: INTRODUCCIÓN

El hormigón es el principal material utilizado para la construcción, dado su bajo costo, alta durabilidad y su adecuada resistencia a la compresión, pero su principal defecto radica en su baja resistencia a la tracción y a los impactos, convirtiéndolo en un material frágil a partir de la aparición de las primeras fisuras.

Intensas investigaciones en las últimas décadas han producido un gran desarrollo en la industria de la construcción, que ha alcanzado no sólo a las técnicas de diseño y de cálculo, sino también al propio hormigón. Dentro de estas nuevas tecnologías se encuentra en un lugar muy destacado el empleo de fibras de polipropileno con el objeto de reforzar el hormigón, permitiendo controlar la formación de las fisuras, acompañado de un incremento considerable de la resistencia a la tracción, resultando un método fácil, práctico y económico para superar estas deficiencias.

En la actualidad la mayoría de los constructores utilizan las fibras como un sistema de refuerzo en el hormigón sin conocer sus características y propiedades, y peor aún sin utilizar un criterio técnico que permita evaluar la calidad del hormigón fibroreforzado, limitándose a utilizar cantidades mínimas de fibra o las recomendadas por los fabricantes.

En el presente trabajo se estudiará la influencia de la adición de fibras de polipropileno en el hormigón, permitiéndonos analizar su real comportamiento el mismo que ayudará a evaluar sus propiedades mecánicas, estableciendo cantidades y concentraciones óptimas de fibra para su refuerzo en el hormigón, resultando una guía práctica para estudiantes y profesionales interesados en el tema.

CAPÍTULO I
EL PROBLEMA

1.1 TEMA:

"Comportamiento del hormigón reforzado con fibras de polipropileno y su influencia en sus propiedades mecánicas en el Cantón Ambato, Provincia de Tungurahua"

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.2.1 Contextualización

El hormigón es uno de los materiales de construcción artificiales más antiguos que se conocen. Desde épocas ancestrales el hombre usó fibras para conseguir abrigo, construyendo sus casas de pajas, luego de adobe, con el empleo de diferentes materiales orgánicos que tomó de la naturaleza, incluyendo la madera. Los romanos empleaban un hormigón a base de cal y puzolanas para realizar sus construcciones, muchos de cuyos restos han llegado hasta nuestros días permaneciendo intactos durante más de dos mil años, expuestos al ataque de los agentes ambientales.

"A lo largo de la historia, la idea de reforzar con materiales fibrosos se remonta al antiguo Egipto en donde se introducía paja al macizo arcilloso con el cual confeccionaban ladrillos para conferirle una mayor resistencia y por lo tanto una buena manejabilidad después de la cocción al sol."[1] El refuerzo de hormigón mediante añadido de fibras durante el amasado del mismo es una técnica que se ha

---

[1] *MACCAFERRI, Nahan "Manual de Fibras para concreto"*

implantado desde hace varias décadas encontrando diversas aplicaciones dentro del campo de los hormigones estructurales y que actualmente sigue siendo objeto de estudio de numerosos investigadores produciendo un gran avance en la industria de la construcción.

"Se destacan los estudios realizados por Porter en 1910 y ya en 1911 Graham propone la utilización de fibras de acero para mejorar en el hormigón la resistencia y la estabilidad. La primera patente data de 1914, en Estados Unidos, dada a William Ficklin para proteger la invención de un hormigón resistente a la fisuración y al desgaste, añadiéndole virutas metálicas a la matriz de hormigón, además se comienzan los estudios acerca de las características físico-mecánicas del hormigón masivo al cual le fueron introduciendo "clavos picados" y pedazos de piezas metálicas.

Durante la segunda guerra mundial los estudios se incrementaron y la primera gran obra donde se usan fibras de acero se le atribuye al arquitecto Pier Lugi Nervi, llamado el padre o re-descubridor del ferro-cemento, cuando construye la cúpula del Palacio de los Deportes de Roma en 1946." [2]

A partir de los años 50 se realizaron los primeros estudios sobre la utilización de fibras de acero y vidrio en el hormigón observando que se producía una mejora en sus propiedades. La adición de estas fibras, añaden a la matriz de hormigón una red de pequeñas armaduras que le proporcionan una mayor trabazón; mientras que en los años 60 aparecen los primeros estudios sobre hormigones fibro-reforzados con fibras sintéticas.

En los últimos años las fibras sintéticas han sido utilizadas para mejorar diferentes propiedades que el hormigón armado no posee. La más importante aplicación de las fibras sintéticas es la prevención de formación de grietas por tracción. En cuanto a las propiedades mecánicas, otra mejora que las fibras

[2] *MACÍAS, José. Utilización de Fibras en Hormigones, Quito, 2009*

sintéticas aportan al hormigón es su resistencia a la corrosión. Como es sabido, el hormigón armado, presenta un gran problema con la corrosión de sus armaduras producida por agentes agresivos como son los cloruros y los ácidos.

"Los hormigones armados están diseñados con un recubrimiento mínimo de las armaduras, pero esto no es suficiente ya que el hormigón es un material frágil y una vez cargado y sometido a tracción se fisura. Por estas fisuras acceden los agentes agresivos hasta las armaduras de acero produciendo su corrosión por tanto debilitando su capacidad portante."[3]

"Las fibras sintéticas son inertes a la corrosión y debido a sus características y una vez adicionadas a la matriz de hormigón, "cosen" estas fisuras evitando que sean corroídas. Otra mejora del hormigón con fibras sintéticas es la influencia que éstas tienen sobre la retracción plástica. Cuando el hormigón se encuentra en estado plástico, se produce una pérdida de humedad debido principalmente a la evaporación a la atmósfera y a la absorción por parte del encofrado. En este proceso de pérdida de agua, se produce un efecto de capilaridad por presiones negativas, las cuales desarrollan en el hormigón deformaciones de compresión.

Estas deformaciones de compresión, provocan lejos de dicha zona tracciones que causan grietas internas en hormigones que todavía tienen una corta edad, la adición de fibras evita dentro de lo posible que se formen esas grietas, cosiendo la matriz de hormigón."[4]

En la actualidad la industria de la construcción en nuestro país es muy apegada a las tradiciones y, por lo tanto, un poco reacia a innovar. La fibra es una tecnología muy eficiente, pero aún subvalorada, porque es considerada muy nueva y quizás poco probada; no así en el extranjero, donde se presenta como una tecnología exitosa en la construcción de hormigones de espesor más fino, especialmente pensado para la producción de paneles de revestimiento, paneles ondulados de cubierta, conductos, canalizaciones, barreras anti-ruido, casetas eléctricas, etc.

---

[3] *BRAVO, José. Comportamiento mecánico del Hormigón reforzado con fibras. Chile, 2003.*
[4] *MACÍAS, José. Utilización de Fibras en Hormigones, Quito, 2009*

1.2.2 Análisis Crítico

La mayoría de las construcciones civiles en la ciudad de Ambato utilizan materiales compuestos, los mismos que se producen cuando dos ó más materiales se unen para lograr una combinación de propiedades que no puede ser obtenida sólo con los materiales originales.

Esta necesidad de mejorar las propiedades en los materiales y la situación socio-económica junto con el déficit de vivienda existente en el país y en el mundo, requieren urgentemente de nuevos productos y a la vez de nuevas técnicas de construcción acorde con el desarrollo de la tecnología, que permitan mejorar los procesos constructivos y las propiedades índice de los materiales y agregados para lo cual desde hace varios años se han desarrollado diversos hormigones para propósitos especiales.

"El método más corriente es que la matriz basada en cemento sea modificada de algún modo para mejorar determinadas propiedades, reemplazando componentes o utilizando aditivos, adiciones o ambos. Entre estos hormigones especiales se encuentra el hormigón con fibra".[5]

La adición de fibra en el concreto busca mejorar algunas de sus propiedades mecánicas tales como rigidez, tenacidad y resistencia a la tracción. Sin embargo los constructores utilizan estas fibras sin considerar sus propiedades en este caso las fibras de polipropileno y por ende esto genera un alto grado de incertidumbre al momento de realizar el hormigón ya que al no conocer las propiedades de sus componentes no podemos garantizar cómo influirá la fibra en el concreto.

Además la cantidad y porcentaje de fibra que se adicionará es otro factor muy importante que se debe considerar ya que debe cumplir con ciertas normas y requisitos técnicos para la elaboración de hormigón.

---

[5] *CAMANIERO, Raúl. Dosificación de Mezclas. Quito, 2008.*

1.2.3 La Prognosis

De no llevarse a cabo la investigación planteada evitará y por ende retrasará el desarrollo de nuevas técnicas de construcción en la ciudad de Ambato, resultando inútil la utilización de fibras de polipropileno y su adición en el hormigón debido a que no se conocerán las propiedades mecánicas del hormigón al adicionar la fibra.

Es importante destacar que si no se realizan los ensayos pertinentes al adicionar las fibras de polipropileno, no se conocerá a ciencia cierta cómo se modificarán sus propiedades al aumentar o disminuir la cantidad de fibra, provocando a futuro daños irreparables en las estructuras en que haya sido utilizado este tipo de hormigón.

1.2.4 Formulación del Problema

¿Cómo influye el comportamiento del hormigón reforzado con fibras de polipropileno en sus propiedades mecánicas en el Cantón Ambato, Provincia de Tungurahua?

1.2.5 Preguntas Directrices

¿Existen estudios sobre el comportamiento del hormigón reforzado con fibras de polipropileno en construcciones civiles en el Cantón Ambato, Provincia de Tungurahua?

¿Cómo varían las propiedades mecánicas del hormigón al adicionar fibras de polipropileno?

¿Cuál es el porcentaje de fibra de polipropileno necesario para obtener una dosificación óptima, al momento de elaborar hormigón?

1.2.6 Delimitación del problema

1.2.6.1 De Contenido

La presente investigación requiere de estudios de Mecánica de Suelos, y Ensayo de Materiales.

1.2.6.2 Espacial

Los agregados para la elaboración de probetas de hormigón se obtendrán de las principales canteras que abastecen de material pétreo a la ciudad de Ambato.

La fibra de polipropileno será seleccionada después de realizar los ensayos necesarios en los agregados, cumpliendo con las normas vigentes para la utilización de la fibra. Los estudios necesarios se los realizarán en el laboratorio de Ensayo de Materiales y Mecánica de Suelos de la Universidad Técnica de Ambato.

1.2.6.3 Temporal

El desarrollo de esta investigación se realizará en el período comprendiendo entre los meses de Marzo - Agosto 2013.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Esta investigación se realizará con la finalidad estudiar la influencia de la incorporación de fibra de polipropileno en el hormigón y la información que se origine durante este período será de vital importancia porque permitirá conocer el porcentaje óptimo de fibra de polipropileno necesario para la elaboración de hormigón de distintas resistencias, de tal manera que no altere su calidad y función.

De todo lo expuesto, se considera importante realizar esta investigación para que la información generada aporte con la utilización de fibras de polipropileno como refuerzo en el hormigón utilizando un agregado propio de nuestra ciudad y provincia, debido a la poca o nula información que en la actualidad existe en nuestro país acerca de este material compuesto.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General

Determinar el comportamiento del hormigón reforzado con fibras de polipropileno y su influencia en sus propiedades mecánicas en el Cantón Ambato, Provincia de Tungurahua.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Analizar el comportamiento del hormigón reforzado con fibras de polipropileno aptos para las construcciones civiles de la ciudad de Ambato.

- Determinar cómo varían las propiedades mecánicas del hormigón al adicionar distintos porcentajes de fibra de polipropileno.

- Proponer porcentajes de fibra de polipropileno adecuados para la elaboración de hormigón de distintas resistencias, de acuerdo a las propiedades de los agregados.

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

Beltrán Luis (1986) en su tesis de Grado "Hormigón reforzado con fibras de polipropileno", menciona que "el hormigón reforzado con fibras ha sido utilizado por diversas instituciones ecuatorianas, tanto públicas como privadas. Un ejemplo relevante de esto son las investigaciones realizadas por el entonces Instituto Ecuatoriano de Electrificación, INECEL, sobre hormigón con la incorporación de fibras de acero, como una posible alternativa de utilización en el desagüe de fondo de la presa, así como también en el recubrimiento de los túneles con fibras en el acceso a la casa de máquinas del Proyecto Hidroeléctrico Agoyán, en la provincia de Tungurahua, en el año de 1985."

Barros Verónica (2012) en su tesis de grado "Diseño de hormigones con fibras de polipropileno para resistencias a la compresión de 21 y 28 Mpa con agregados de la cantera de Pifo" concluye que "la adición de fibras al hormigón es la técnica más efectiva para evitar o controlar la formación de grietas por retracción plástica. De todas las fibras conocidas en el mercado las fibras de polipropileno son las más efectivas, considerando que el polipropileno es económico e inerte a ambientes de pH alto y además fácil de dispersar."

Rojas Jairo (2012) en su tesis de grado "Diseño de hormigones con fibras de polipropileno para resistencias a la compresión de 21 y 28 Mpa con agregados de la cantera de Guayllabamba." menciona que "La adición de fibras en el hormigón proporciona un mejor control de la fisuración, ya que mejora su resistencia residual, la ductilidad, y el aumento de las características mecánicas del mismo, así como su carga de rotura."

2.2 FUNDAMENTACIÓN FILOSÓFICA

Es indispensable conocer las propiedades técnicas de las fibras de polipropileno que se emplean como refuerzo para la elaboración de hormigón de distintas resistencias en la industria de la construcción, debido a que influyen directamente en las propiedades mecánicas del mismo, resultando imprescindible conocer la cantidad de fibra que se adicionará permitiendo obtener hormigones de buena calidad y resistencia estable.

Esta investigación se desarrolla con la finalidad de distinguir el comportamiento del hormigón al adicionar fibras de polipropileno con agregados de la zona que son utilizados en las distintas construcciones civiles de la ciudad de Ambato, y todo sustentado en base a ensayos técnicos de laboratorio con el fin de obtener resultados confiables.

2.3 FUNDAMENTACIÓN LEGAL

"La presente investigación toma como precedente la Norma Técnica Ecuatoriana en la cual establece que los materiales de construcción, serán evaluados y verificados para que cumplan con los requisitos, conforme con el Reglamento Técnico Ecuatoriano (RTE INEN) y la Norma Técnica Ecuatoriana (NTE INEN), que se encuentren vigentes; de no existir éstos se remitirán a los requisitos dados en las normas ASTM."[6]

2.3.1 El Hormigón y sus componentes

El **cemento hidráulico** se puede comercializar envasado en fundas de papel, fundas de plástico, bolsas grandes, al granel o en la forma que acuerden comprador y vendedor en el contrato de pedido. El cemento en fundas debe cumplir con la norma NTE INEN 1902. Las normas que contienen los procedimientos de ensayos a utilizar son:

[6] *NTE INEN 855-2002*

- **NTE INEN 156 (ASTM C 188):** Cemento hidráulico. Determinación de la densidad.
- **NTE INEN 158 (ASTM C 191):** Cemento hidráulico. Determinación del tiempo de fraguado. Método de Vicat.

"Los **Áridos** son materiales granulares que constituye el mayor volumen en la mezcla para la preparación de un hormigón. Sus propiedades físicas y mecánicas juegan un papel muy importante en las del hormigón. Puede provenir de la trituración de mantos de roca natural o de cantos rodados, o de materiales artificialmente fabricados." [7] Los ensayos que se realizan son:

- **NTE INEN 696 (ASTM C136):** Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso.
- **NTE INEN 856 (ASTM C128)**: Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino.
- **NTE INEN 857 (ASTM C127):** Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso.
- **NTE INEN 858(ASTM C 29):** Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico) y el porcentaje de vacíos**.**
- **NTE INEN 860 (ASTM C131):** Determinación del valor de la degradación del árido grueso de partículas menores a 37.5 mm mediante el uso de la máquina de los ángeles.
- **NTE INEN 859 (ASTM C70):** Determinación de la humedad superficial en el árido fino.

El **agua** desempeña uno de los papeles vitales en el hormigón. Es el componente que se combina químicamente con el cemento para producir la pasta que aglutina las partículas del árido, las mantiene unidas y colabora en gran medida con la resistencia y todas las propiedades mecánicas del hormigón. El agua empleada en el mezclado de hormigón, debe cumplir con las disposiciones de la norma ASTM C 1602.

[7] *NTE INEN 872*

2.3.2 Dosificación de las mezclas de Hormigón

Las mezclas de hormigón se deben dosificar para cumplir con la relación máxima de agua-cemento (*a/c*) y otros requisitos según la clase de exposición asignada al elemento estructural. El hormigón estructural, la resistencia a la compresión no será menor a *f´c*= 21 MPa. La dosificación se puede basar también en la experiencia de obras similares, en mezclas de prueba o en ambas. La evaluación y aceptación del hormigón será según lo indicado en las normas

- NTE INEN 1 855-1 (ASTM C 94) y NTE INEN 1 855-2.

2.3.3 Toma de muestras de Hormigón

La toma de muestras de hormigón debe ser obtenida de acuerdo a la norma NTE INEN 1-763, además el número de cilindros deben ser los indicados en las especificaciones de la obra o en la NTE INEN 1855-1.

2.3.4 Fibras Dispersas

"El término "fibras estructurales" requiere de ciertas normas y ensayos que debido a su adición al concreto aporta o contribuye de manera efectiva a la capacidad de carga a flexión, de corte y de impacto en un elemento de concreto, además de mejorar el control de fisuras por retracción y la durabilidad del concreto." [8] Las fibras a ser utilizadas como refuerzo estructural de hormigón deben cumplir con las siguientes normas:

- **ASTM C1017 / C1017M:** Especificación para aditivos químicos utilizados en la elaboración de hormigón fluido.
- **ASTM C1116:** Especificación para hormigón reforzado con fibras.
- **ASTM A 820.** Adiciones y fibras dispersas a ser utilizadas como refuerzo de hormigón.

[8] ASTM C1017 / C1017M

2.4 CATEGORÍAS FUNDAMENTALES

2.4.1 Supraordinación de las variables

Variable Independiente

Fibras

Clasificación fibras

Características de las fibras

Hormigón Reforzado con Fibras Polipropileno

Gráfico # 1 Supraordinación de la Variable Independiente

Variable Dependiente



Gráfico # 2 Supraordinación de la Variable Dependiente

2.4.2 Definiciones

DEFINICIONES DE LOS NIVELES DE SUPRAORDINACIÓN DE LA VARIABLE INDEPENDIENTE

FIBRAS

La norma ASTM C - 1116 define las fibras como: “Filamentos finos y alargados en forma de haz, malla o trenza, de algún material natural o manufacturado que pueda ser distribuido a través de una mezcla de hormigón fresco.” [9]

Las fibras son hilos cortos distribuidos de forma aleatoria sobre la matriz (hormigón). Un parámetro interesante que describe una fibra es la relación entre la longitud y el diámetro equivalente de la fibra. El diámetro equivalente de la fibra es el diámetro de un círculo de igual área a la sección de la fibra.

Las fibras otorgan grandes beneficios de los cuales podemos citar los más importantes: reduce la fisuración, incrementa la fuerza mecánica, proporciona características eléctricas, incombustibilidad, estabilidad dimensional, compatibilidad con matrices orgánicas, baja conductividad térmica, y alta resistencia a agentes químicos.[9]

Para el uso efectivo de fibras en el concreto se deben tener contempladas las siguientes características:

- Las fibras deben ser significativamente más rígidas que la matriz, es decir, un módulo de elasticidad más alto.
- Debe existir una buena adherencia entre la fibra y la matriz.
- La longitud de las fibras debe ser suficiente.
- Las fibras deben tener una alta relación de aspecto; es decir, deben ser largas con relación a su diámetro.

---

[9] *ASTM C-1116, Standard Specification for Fiber Reforced Concrete and Shorcrete.*

CLASIFICACIÓN DE LAS FIBRAS

Existen diferentes tipos de fibras para el hormigón en función de la materia prima por la cual ellas están producidas: [10]

Orgánicas: Coco, Sisal, Bagazo de caña de azúcar, bambú, yute, madera
Inorgánicas: vidrio, metálicas
Sintéticas: nylon, aramida, carbón, polietileno, polipropileno.

Fibras Orgánicas

- **Fibras de Coco.**

"El coco posee fibras duras unidas entre sí por un material blando. Estas pueden ser extraídas por inmersión en agua de manera tal que se descomponga el material suave y se recuperen las fibras duras, es el método tradicional de los países pobres aún cuando existe la posibilidad alternativa de utilizar métodos mecánicos de extracción que son más caros y requieren de un basamento tecnológico."[11]

- **Fibras de Sisal**

"Las fibras de sisal son las más fuertes que podemos encontrar dentro de las fibras naturales, está ampliamente difundido su cultivo y uso para reforzar el hormigón. Muchas investigaciones en este campo han sido llevadas a cabo con ellas y los resultados han sido satisfactorios." [11]

- **Fibras de Bagazo de Caña de Azúcar**

El cultivo de la caña de azúcar es propio de las regiones tropicales y subtropicales cuya función principal es obtener el azúcar. El proceso de obtención del azúcar

---

[10] *MACCAFERRI, Nahan "Manual de Fibras para concreto"*
[11] *MACÍAS, José. Utilización de Fibras en Hormigones, Quito, 2009*

está dada a partir de la maceración de la caña para extraerle el jugo y queda el bagazo. Dicho bagazo tiene amplios usos conocidos tales como en tableros y en la industria papelera, pero también se usan en hormigones.

El bagazo contiene alrededor del 50 % de fibra, un 30 % de jugo y el otro 20 % restante lo componen otros sólidos solubles. Para obtener una buena fibra a incorporar al hormigón es necesario eliminar el jugo y remover dichos sólidos, lo cual se hace a través del lavado con agua.

- **Fibras de Bambú**

"La planta de bambú puede llegar a tener alturas de hasta 15 metros y un grosor variable entre 25 y 100 mm. Debe ser utilizado seco y sirve para reforzar el hormigón en sustitución de las barras de acero, o sea, se emplea como material continuo de refuerzo. Tiene una alta capacidad de absorción del agua y un bajo módulo de elasticidad."[12]

- **Fibras de Yute**

"La fibra de yute posee diferentes usos y debido a su resistencia a la tensión las fibras de yute pueden ser usadas en matrices de cemento. El proceso para obtener las fibras de yute es muy simple: las plantas maduras son cortadas y remojadas en agua, aproximadamente a las cuatro semanas ya la corteza está descompuesta, entonces las fibras expuestas son despojadas del tallo, lavadas y secadas".[12]

- **Fibras de Madera**

La madera posee resistencias a la tensión variables sobre la base de su tipo. Una pieza de madera normal posee resistencias sobre los 70 MPa, pero en su formación tiene defectos y las fibras que la conforman, de forma simple, pueden alcanzar resistencias unas diez veces superiores. Las longitudes de las fibras de

[12] *MACÍAS, José. Utilización de Fibras en Hormigones, Quito, 2009*

madera desde 2.5 mm a 7 mm normalmente. La producción de pulpa de madera, es la forma más empleada en producciones secundarias, y se obtienen por procesos químicos denominados Kraft siendo una de las más comúnmente usadas para reforzar el cemento.

Fibras Inorgánicas

- **Fibras de Acero**

Las fibras de acero son elementos de corta longitud y pequeña sección que se adicionan al hormigón con el fin de conferirle ciertas propiedades específicas, con las características necesarias para dispersarse aleatoriamente en una mezcla de hormigón en estado fresco, empleando metodologías de mezclado tradicionales. La fibra de acero generalmente conocida, es fabricada en base al estiramiento y corte de alambre de acero de diámetros típicos que van desde (0.25 a 0.76) mm.

Las principales fibras de acero según su forma son:

Gráfico # 3 Formas de fibras de Acero

Fuente: *MACCAFERRI, Nahan "Manual de Fibras para concreto"*

- **Fibra de Vidrio**

La fibra de vidrio es un producto de origen mineral, que se elabora a partir de arena de sílice, que es un material compuesto consistente en fibras continuas o discontinuas de vidrio embebidas en una matriz plástica. A partir de la arena de sílice se añaden otros componentes, como cal, alúmina y magnesia así como también determinados óxidos, en proporciones muy estrictas, con el fin de obtener el producto con las características deseadas.

Las fibras de vidrio se emplean en longitudes que van de 12 a 50 mm y han tenido un auge relativo en los procesos constructivos. La principal dificultad que se ha presentado con las fibras de vidrio es que su comportamiento depende del tipo de matriz en que se encuentren. En el caso de materiales neutros o poco alcalinos, como el yeso o los cementos aluminosos, el vidrio E, de tipo borosilicato con bajo contenido de álcali, utilizado para reforzar plásticos da muy buenos resultados, no así con los cementos comunes de alcalinidad elevada donde las fibras tienden a desintegrarse expandiéndose el hormigón.

El vidrio se utiliza como material de refuerzo debido a las siguientes razones:

- Es un buen aislante térmico y resistente a elevadas temperaturas.
- Son químicamente inertes muy útiles en ambientes corrosivos.

Gráfico # 4 Fibra de Vidrio



Fuente: *MACCAFERRI, Nahan "Manual de Fibras para concreto"*

Fibras Sintéticas

Las fibras sintéticas son artificiales; resultan de la investigación y desarrollo en las industrias petroquímicas y textiles. Existen dos formas físicas diferentes de fibras: la de multifilamentos, y las producidas de cintas de fibrilla. La mayoría de las aplicaciones de las fibras sintéticas están en el nivel de 0.1% por volumen. A ese nivel, se considera que la resistencia del concreto no se ve afectada y se buscan las características de control de las grietas.[13]

- **Fibras de Acrílico**

Las fibras acrílicas han sido usadas para reemplazar la fibra de asbesto en muchos productos de concreto reforzado con fibras. También se han agregado fibras acrílicas al concreto convencional a bajos volúmenes para reducir los efectos del agrietamiento por contracción plástica.

- **Fibras de Aramida**

Las fibras de aramida son dos veces más resistentes que las fibras de vidrio y cinco veces más que las fibras de acero, por unidad de masa. Debido al costo relativamente alto de estas fibras, el concreto reforzado con fibras de aramida se ha usado principalmente como un reemplazo del asbesto en ciertas aplicaciones de alta resistencia.

- **Fibras de Carbono**

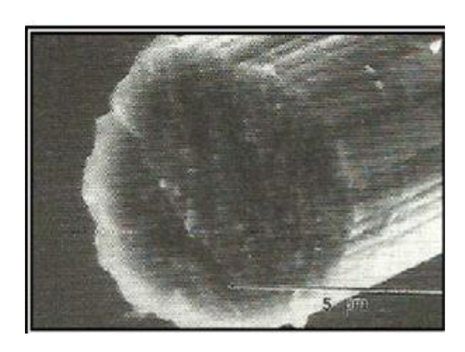
Las fibras de carbono son sustancialmente más costosas que los otros tipos de fibras. Por esta razón su uso comercial ha sido limitado. Las fibras de carbono son fabricadas carbonizando materiales orgánicos adecuados en forma fibrosa a altas temperaturas y luego alineando los cristales de grafito resultantes por medio de estiramiento.

---

[13] *CUENCA, Estefanía. Introducción Sobre HRF Y HAC.*

“Tienen alta resistencia a tensión y alto módulo de elasticidad y una característica quebradiza bajo esfuerzo-deformación. Se requiere de investigación adicional para determinar la viabilidad del concreto con fibra de carbón en una base económica. Las propiedades de resistencia al fuego de los compuestos de fibras de carbón necesitan ser evaluadas, pero ignorando el aspecto económico, las aplicaciones estructurales parecen ser prometedoras.”[14]

Gráfico # 5 Fibra de Carbono



Fuente: *MACCAFERRI, Nahan “Manual de Fibras para concreto”*

- **Fibras de Nylon**

“El nylon es estable en el calor, hidrófilo, relativamente inerte y resistente a una gran variedad de materiales. Es particularmente efectivo para impartir resistencia al impacto y tenacidad a flexión y para sostener e incrementar la capacidad para soportar cargas del concreto después de la primera grieta.”[15]

- **Fibras de Polietileno**

“El polietileno ha sido producido para el concreto en forma de monofilamentos con deformaciones superficiales parecidas a verrugas. El concreto reforzado con fibras de polietileno con contenidos entre 2 y 4% por volumen exhibe un comportamiento lineal bajo cargas de flexión hasta la primera grieta, seguido por una transferencia de carga aparente a las fibras, permitiendo un incremento en la carga hasta que las fibras se rompen.”[14]

---

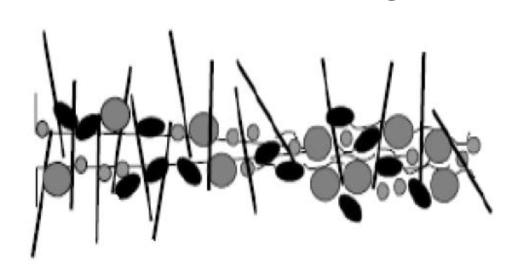
[14] *MACÍAS, José. Utilización de Fibras en Hormigones, Quito, 2009*
[15] *CUENCA, Estefanía. Introducción Sobre HRF Y HAC.*

- **Fibras de Polipropileno**

Este tipo de fibras tienen ciertas propiedades que las hacen más favorables para su mezclado en el hormigón debido a que son químicamente inertes y resistentes a la corrosión, a diferencia de las fibras de acero; son muy estables y presentan una superficie impermeable por lo cual no quita agua de mezclado, son livianas, y pueden ser fabricadas en diversas formas y con costos más bajos que otros tipos de fibras.

"Las fibras de polipropileno contribuyen al comportamiento post-pico del hormigón, ya que al estar distribuidas tridimensionalmente, cosen las fisuras formando un "puente" entre los áridos gruesos (véase gráfico # 6), permitiendo una formación controlada de las fisuras, y llevando al hormigón a un comportamiento dúctil después de la fisuración inicial, evitando así la fractura frágil."[16]

Gráfico # 6 Fibras embebidas en el hormigón cosiendo la fisura



Fuente: *PUJADAS, P. "Durabilidad del hormigón con fibras de polipropileno"*

Tipos de Fibras de polipropileno

- **Fibra de polipropileno multifilamento**

El polipropileno es un polímero de hidrocarburo sintético, cuyas fibras se forman de la unión de monofilamentos obtenidos a través de procesos de extrusión por medio de estiramiento en caliente del material a través de un troquel de sección circular.

---
[16] *PUJADAS, P. Durabilidad del hormigón con fibras de polipropileno.*

Conocidas también como micro-fibras, ya que su diámetro es menor a 0,50 mm, está conformada por un conjunto de filamentos de polipropileno y su principal característica es que son anticorrosivas, antimagnéticas y 100 % resistentes a prueba de álcalis.

Gráfico # 7 Fibra de polipropileno tipo multifilamento



Fuente: *http://www.hormigonespecial.com*

- **Fibra de polipropileno fibrilada**

Fibras de polipropileno fibriladas son el producto de un proceso de extrusión en el que la matriz es rectangular, dando como resultado fibras en forma cintas de igual ancho, las que posteriormente son cortadas según la longitud requerida.[17]

Gráfico # 8 Fibra de polipropileno de tipo fibrilada



Fuente: *http://www.hormigonespecial.com*

---

[17] *ACI Committee 544.* ***State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concret.e 544.1R-42****.*

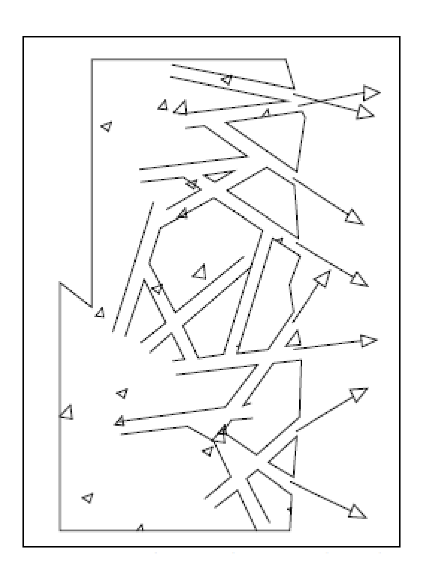
Fibras de polipropileno como protección pasiva del hormigón contra el fuego.

Recientes investigaciones han llegado a la conclusión que el agregar a la matriz del hormigón micro-fibras, de polipropileno (de tipo multifilamento y diámetros menores a 0,50 mm) reducen significativamente el fenómeno de "spalling" en el hormigón durante un incendio.

El mecanismo por el que las fibras de polipropileno contribuyen a reducir el fenómeno de "spalling" es simple, debido a que en el momento que se alcanzan los 160 ºC las fibras de polipropileno se derriten reduciendo el volumen que ocupan. Al alcanzarse los 360ºC el polipropileno se evapora creando una serie de conductos en el interior de la matriz que llegan hasta la superficie.

Parte de estos gases son liberados en la atmósfera por medio de los pequeños canales que se crean debido a la "desaparición" de las fibras. Estos pequeños conductos son utilizados también por los gases que se producen por la evaporación del agua interna en el hormigón, reduciendo así la presión.[18]

Gráfico # 9 Vía de escape de los gases dentro de la matriz



Fuente: *HANNANT, L., (1994)*

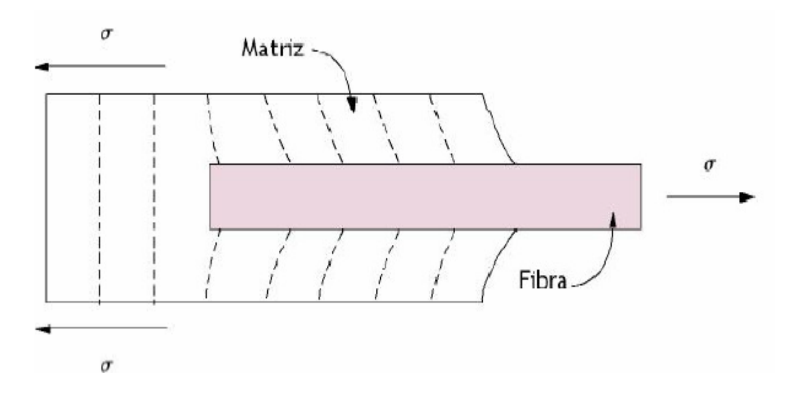
[18] *HANNANT, L., (1994), "Fiber – Reinforced Cements and Concrets". En: ILLSTON, J., "Materiales de Construcción; su naturaleza y problemas", p. 359, Londres, (2002).*

CARACTERÍSTICAS DE LAS FIBRAS

- **Influencia de la longitud de la fibra**

Las características mecánicas de los compuestos reforzados con fibras dependen no sólo de las propiedades de la fibra, sino también del grado en que una carga aplicada se transmite a la fibra por medio de la fase matriz. En este proceso de transmisión de carga es muy importante la magnitud de la unión en la interfaz de las fases matriz y fibra. Al aplicar un esfuerzo de tracción, la unión fibra-matriz cesa en los extremos de la fibra y en la matriz se genera un patrón de deformación como el que se muestra en el gráfico # 10; en otras palabras, en los extremos de la fibra no hay transmisión de carga desde la matriz.[19]

Gráfico # 10 Patrón de deformación en una matriz que rodea a una fibra sometido a un esfuerzo de tracción.



Fuente: *Hernández, José "Hormigón reforzado con fibra de polipropileno- Bloque II"*

- **Influencia de la Orientación y de la Concentración de la Fibra**

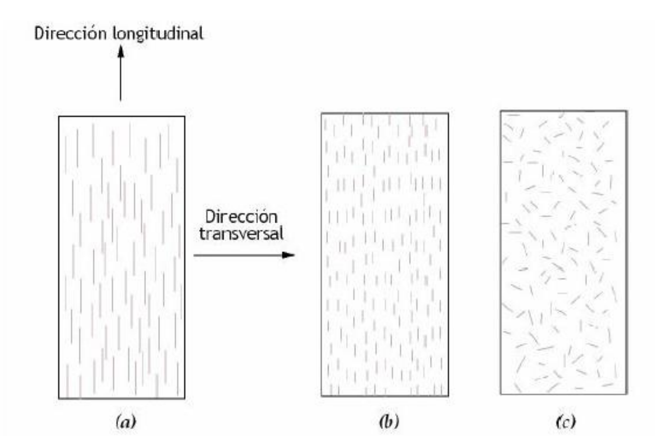
La disposición u orientación relativa de las fibras, su concentración y distribución influyen en la resistencia y en otras propiedades de los materiales compuestos reforzados con fibras.

1. Alineación paralela de los ejes longitudinales de las fibras
2. Alineación al azar. Las fibras continuas se alinean (Gráfico # 11.a)

[19] *HERNÁNDEZ, José "Hormigón reforzado con fibra de polipropileno- Bloque II"*

3. Mientras que las fibras discontinuas se pueden alinear (Gráfico # 11.b) o bien se pueden orientar al azar (Gráfico # 11.c) o alinearse parcialmente.

Gráfico # 11 Representaciones esquemáticas de compuestos reforzados con fibras (a) continuas y alineadas, (b) discontinuas y alineadas y (c) discontinuas y orientadas al azar



Fuente: *Hernández, José "Hormigón reforzado con fibra de polipropileno- Bloque II"*

- **Fase Fibrosa**

"Una importante característica de las fibras con diámetros pequeños es que son mucho más resistentes que el material macizo con fibras de diámetros más grandes. Como es sabido, la probabilidad de la presencia de una imperfección superficial crítica que conduzca a la rotura disminuye cuando aumenta el volumen específico. Este fenómeno se utiliza con ventaja en los compuestos reforzados con fibras. El material utilizado como fibra de refuerzo debe tener alta resistencia a la tracción."[20]

- **Fase Matriz**

La fase matriz de un material compuesto con fibras ejerce varias funciones. En primer lugar, une las fibras y actúa como un medio que distribuye y transmite a las fibras los esfuerzos externos aplicados; por otra parte, el módulo elástico de la

[20] *Muñoz, Fernando. "Hormigón reforzado con fibra de polipropileno multifilamento"*
[22] *Hernández, José "Hormigón reforzado con fibra de polipropileno- Bloque II"*

fibra debe ser mucho mayor que el de la matriz. En segundo lugar, la matriz protege las fibras del deterioro superficial que puede resultar de la abrasión mecánica o de reacciones químicas con el medio ambiente.

Finalmente, la matriz separa las fibras y, en virtud de su relativa blandura y plasticidad, impide la propagación de grietas de una fibra a otra. Aunque algunas fibras individuales se rompan, la rotura total del material compuesto no ocurrirá hasta que se hayan roto gran número de fibras adyacentes. Es esencial que la adherencia de la unión entre fibra y matriz sea elevada para minimizar el arrancado de fibras. En efecto, la resistencia de la unión tiene gran importancia en el momento de seleccionar la combinación matriz-fibra. La resistencia a la tracción final del compuesto depende, en gran parte, de la magnitud de esta unión; una unión adecuada es esencial para optimizar la transmisión de esfuerzos desde la matriz a las fibras.[21]

HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO

Los hormigones y morteros de cemento tienen como característica principal su elevada resistencia a compresión, pero escasa resistencia a tracción. Dichos hormigones y morteros son reforzados con armaduras convencionales de acero para soportar esfuerzos de tracción, generando un refuerzo continuo de gran efectividad y utilidad en la construcción de obra civil.

Según el ACI 116R-00, el HRF (Hormigón Reforzado con Fibra) es una combinación de cemento hidráulico, agua, áridos finos y gruesos, aditivos, adiciones y fibras dispersas aleatoriamente orientadas. Las fibras pueden ser naturales o artificiales según su naturaleza y tienen como fin reforzar la masa del cemento incrementando la resistencia a la tracción disminuyendo la fisuración y aumentando la tenacidad mediante la transmisión de esfuerzos a través de la sección fisurada. Por otro lado la adición de fibras disminuye los efectos de la retracción por fraguado y aumenta la resistencia al impacto y la fatiga.

[21] *MUÑOZ, Fernando. "Hormigón reforzado con fibra de polipropileno multifilamento"*

"El hormigón adicionado con fibras de polipropileno obtiene las siguientes propiedades: lo refuerza tridimensionalmente, evita la formación de hundimientos y fisuras en edades tempranas, impide y controla la formación de grietas en edades superiores, aumenta la resistencia a los impactos, las cargas repetitivas y vibratorias, evita el deslizamiento del hormigón en planos inclinados, evita el deslizamiento vertical, reduce la permeabilidad y aumenta la resistencia a los factores abrasivos y corrosivos".[22]

DEFINICIONES DE LOS NIVELES DE SUPRAORDINACIÓN DE LA VARIABLE DEPENDIENTE

AGREGADOS

Es el término que se emplea para definir al material pétreo que se utiliza en el hormigón, independientemente de su tamaño. El término agregado abarca a las arenas, gravas naturales y piedra triturada, y también a los materiales especiales utilizados para producir hormigones livianos y pesados. .

Los agregados conforman el esqueleto granular del concreto y es el elemento mayoritario ya que representa el 80-90% del peso total de concreto, por lo que son responsables de gran parte de las características del mismo. Los agregados son generalmente inertes y estables en sus dimensiones.[23]

Funciones de los agregados:

- Bajar el costo del hormigón
- Comunicar su resistencia a la compresión del hormigón.
- Reducir los cambios volumétricos (retracción) durante el fraguado, ya que el cemento disminuye su volumen al fraguar.

[22] *MEDINA, H. Cifuentes. "Hormigón reforzado con fibras de polipropileno. influencia de la ductilidad de la fibra sobre la fragilidad y el efecto tamaño de la fibra"*
[23] *MEDINA, Santiago "Ensayo de Materiales II"*

Clasificación de los Agregados

1. Por su Procedencia

Agregados artificiales.- Provienen de un proceso de transformación de los agregados naturales, dichos agregados artificiales son productos secundarios.

Algunos de estos agregados son los que constituyen la escoria siderúrgica, la arcilla horneada, el hormigón reciclado, piedra triturada (chancada), etc.

Piedra triturada.- Producto que resulta de la trituración artificial de rocas, piedra boleada o pedruscos grandes, del cual todas las caras poseen aristas bien definidas, resultado de la operación de trituración.

Escoria siderúrgica.- Residuo mineral no metálico, que consta en esencia de silicatos y aluminosilicatos de calcio y otras bases, y que se produce simultáneamente con la obtención del hierro.

2. Por su Tamaño

Agregado grueso.-"Se denomina así a la fracción mayor a 5 mm, es uno de los principales componentes del hormigón, por este motivo su calidad es sumamente importante para garantizar buenos resultados en la preparación de estructuras". [24]

Las partículas deben estar libres de tierra, polvo, limo, humus, escamas, materia orgánica, sales u otras sustancias dañinas.

El agregado grueso utilizado en nuestro medio es denominado "Grava", que resulta de la desintegración y abrasión naturales de la roca o procede de la trituración de ésta.

---

[24] *MEDINA, Santiago "Ensayo de Materiales II"*

La calidad, en general, del agregado grueso deberá estar de acuerdo con la norma ASTM C-33[25]. Los porcentajes de sustancias dañinas en cada fracción del agregado grueso, en el momento de la fabricación del hormigón, no deberán superar los siguientes límites:

- Material que pasa por el tamiz No. 200: máx. 0.5%
- Materiales ligeros: máx. 1.0%
- Grumos de arcilla: máx. 0.5%
- Pérdida por abrasión en máquina de Los Ángeles: máx. 40%

Agregado fino.- Se denomina así a la fracción menor a 5 mm, que pasa el cedazo o tamiz # 4 y es retenido en el cedazo número 200. Es el agregado de mayor responsabilidad. A diferencia de la grava, el agua e incluso el cemento, puede decirse que no es posible hacer un buen hormigón sin una buena arena.

Las arenas que provienen del machaqueo de granitos, basaltos y rocas análogas son también excelentes, con tal de que se traten de rocas sanas que no acusen un principio de descomposición.

"Las mejores arenas son las de río, ya que salvo, raras excepciones, son cuarzo puro, por lo que no hay que preocuparse acerca de su resistencia y durabilidad. La arena de mina suele tener arcilla en exceso, por lo que generalmente es preciso lavarla. Las arenas de mar, si son limpias, pueden emplearse en hormigón armado, previo lavado con agua dulce."[26]

Con respecto a la calidad de la arena, ésta deberá cumplir con los requisitos establecidos en la norma ASTM C-33, es decir, no deberá contener cantidades dañinas de arcilla, limo, materiales orgánicos y otras sustancias perjudiciales.

El máximo porcentaje en peso de sustancias dañinas no deberá exceder de los valores siguientes, expresados en porcentaje del peso:

---

[25] *ASTM C-3. Especificación para agregados en el hormigón.*
[26] *MEDINA, Santiago "Ensayo de Materiales II"*

- Material que pasa por el tamiz No. 200: máx. 3.0%
- Materiales ligeros: máx. 1.0%
- Grumos de arcilla: máx. 1.0%
- Otras sustancias dañinas (álcalis, mica, limo): máx. 2.0%

4. **Por su Gravedad Específica**

"Ligeros, Gs < 2.5. Los agregados ligeros, como la arcilla esquistosa y la expandida, la escoria expandida, la Vermiculita, la Perlita, la Piedra Pómez y las Cenizas, se utilizan para producir hormigón aislante, para unidades de mampostería o estructural ligero que pesa entre 400 y 2000 kg/m³.

Normales, 2.5 < Gs < 2.75. Los materiales principales que se usan en el hormigón de peso normal, por lo común de 2300 a 2500 kg/m³, incluyen las arenas y gravas, roca triturada y escoria siderúrgica.

Pesados, Gs > 2.75. Los agregados pesados, como la Magnetita, la Barita o el Hierro de desecho, se usan para producir hormigón de 2900 a 3500 kg/m³." [27]

PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS

Agregado Fino

a) **Granulometría**

Este método de ensayo se utiliza principalmente para determinar la graduación del árido fino. Los resultados se utilizan para determinar el cumplimiento de la distribución granulométrica de las partículas con los requisitos de las especificaciones aplicables y proporcionar la información necesaria para el control de la producción de diversos productos que contengan áridos.

[27] *CHAN, José Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto (2003)*

La granulometría del agregado fino debe cumplir con los límites de la norma (ASTM C-33)[28], generalmente es satisfactoria para la mayoría de los concretos. Los límites establecidos por la norma con respecto al tamaño de las partículas se indican a continuación:

Tabla # 1 Tamaño de Tamices ASTM C-33

Tamaño de la malla	Porcentaje que pasa en peso
9.52 mm (3/8")	100
4.75 mm (No.4)	95 a 100
2.36 mm (No.8)	80 a 100
1.18 mm (No.16)	50 a 85
0.60 mm (No.30)	25 a 60
0.30 mm (No.50)	10 a 30
0.15 mm (No.100)	2 a 10

Fuente: ASTM *C-33. Especificación Normalizada para agregados en el concreto*

Tenemos diferentes tipos de granulometría:

1. Bien Graduada.- Se obtiene cuando el agregado presenta una distribución uniforme de mayor a menor. Su gráfico es una línea continua.

2. Mal Graduada.- No hay una continuidad entre el porcentaje de cada tamiz, es decir, la curva graficada presentará desviaciones.

3. Uniforme.- Se presenta cuando el agregado tiene partículas del mismo tamaño.

4. Abierta o Discontinua.- Se produce cuando en ciertos tamices no se ha retenido material, la curva es discontinua, presenta interrupciones.[29]

[28] *ASTM C-33. Especificación Normalizada para agregados en el concreto*
[29] *BOWLES, Joseph "Manual de Laboratorio de Suelos. Editorial. Mc Graw – Hill México*

b) Módulo de finura

El módulo de finura (MF) del agregado fino se obtiene, conforme a la norma ASTM C-125, sumando los porcentajes acumulados en peso de los agregados retenidos en una serie especificada de mallas. El módulo de finura es un índice de la finura del agregado fino, entre mayor sea el módulo de finura, más grueso será el agregado.

Las mallas que se emplean para determinar el módulo de finura son la de 0.15mm (No.100), 0.30mm (No.50), 0.60mm (No.30), 1.18mm (No.16), 2.36mm (No.8), 4.75mm (No.4), 9.52mm (3/8"), 19.05mm (3/4"), 38.10mm (1½"), 76.20mm (3"), y 152.40mm (6").

"Se considera que el módulo de finura de una arena adecuada para producir hormigón, debe estar entre 2,3 y 3,1 donde un valor menor que 2,0 indica una arena fina; 2,5 una arena de finura media y más de 3,0 una arena gruesa."[30]

c) Densidad Relativa

La densidad relativa (gravedad específica) es la característica generalmente utilizada para el cálculo del volumen ocupado por el árido en las mezclas que contienen áridos, incluyendo hormigón de cemento portland, hormigón bituminoso y otras mezclas que son dosificadas o analizadas en base al volumen absoluto. La mayoría de los agregados naturales tienen densidades relativas entre 2.4 y 2.9. Este ensayo se realiza bajo la norma NTE INEN 856

d) Contenido de Humedad

Este ensayo se lo realiza en base a la norma NTE INEN 862, que consiste en la cantidad de agua que contiene el agregado en un momento dado. Las partículas de agregado pueden pasar por cuatro estados, los cuales se describen a continuación:

---

[30] *BOWLES, Joseph "Manual de Laboratorio de Suelos. Editorial. Mc Graw – Hill México D.F., México.*

1. **Seco al horno (SECO):** Toda la humedad externa es eliminada por calentamiento a una temperatura de 110 ºC.

2. Humedad Natural: Cuando no hay humedad libre o superficial, y la parte de los poros internos de la partícula están llenos de agua.

3. Saturado superficie seca (SSS): Cuando no hay humedad libre o superficial, pero todos los poros de la partícula están llenos de agua.

4. Saturado Superficie Húmeda (SSH): Cuando hay humedad superficial, la partícula está visiblemente mojada, y todos sus poros están llenos de agua.

e) Peso Volumétrico

Se lo realiza en base a la norma NTE INEN 858, para determinar la masa unitaria (peso volumétrico) del árido en condición compactada o suelta y así calcular los vacios entre las partículas.

Agregado Grueso

a) Granulometría

De acuerdo a la Norma ASTM E-11 la serie de tamices utilizados para agregado grueso son 2", 1½", 1", ¾", ½", 3/8", # 4. La granulometría del agregado grueso con un determinado tamaño máximo puede variar moderadamente dentro de un rango, sin que afecte apreciablemente las demandas de cemento y agua de la mezcla, si las proporciones del agregado fino, con relación a la cantidad total de agregados, producen un concreto con buena trabajabilidad. Las proporciones de la mezcla se deben cambiar para producir un concreto trabajable si ocurrieran grandes variaciones en la granulometría del agregado grueso.[31]

[31] BOWLES, Joseph *"Manual de Laboratorio de Suelos. Editorial. Mc Graw – Hill México D.F., México.*

b) Tamaño Nominal Máximo

Es el tamaño del tamiz comercial anterior al primer tamiz en el que hubo el 15% o más retenido.

El tamaño nominal máximo del agregado grueso influye en la economía del concreto. Normalmente, se requiere más agua y cemento en concretos con agregados gruesos de tamaño máximo menor si comparado con agregados de tamaño máximo mayor, debido al aumento del área superficial total del agregado.

Por lo común el tamaño máximo de las partículas de agregado no debe sobrepasar:

- Un quinto de la dimensión más pequeña del miembro de concreto.
- Tres cuartos del espaciamiento libre entre barras de refuerzo.
- Un tercio del peralte de las losas.

c) Densidad Relativa

Se realiza en base a la norma ASTM C 127-80, NTE INEN 857. Este método de ensayo se aplica para la determinación de la densidad promedio en una muestra de árido grueso (sin incluir el volumen de vacíos entre partículas), la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del árido.

Dependiendo del procedimiento utilizado, la densidad es expresada como: seca al horno (SH), saturada superficialmente seca (SSS) o como densidad aparente.

d) Resistencia al Desgaste

Ésta es la prueba que más se aplica para averiguar la calidad global estructural del agregado grueso. Este método establece el procedimiento a seguir para determinar el desgaste, por abrasión, del agregado grueso, menor de1½” (38 mm). El objetivo

de este ensayo, como se lo indica en la norma NTE INEN 860 (ASTM - C131), es medir el desgaste producido por una combinación de impacto y rozamiento superficial en una muestra de agregado de granulometría preparada.

La prueba consiste en hacer golpear una muestra de material con una carga abrasiva dentro de un tambor metálico (giratorio), a una determinada velocidad. Dicho tambor se lo conoce como máquina de Los Ángeles.

La carga abrasiva consiste de esferas de acero. Cada una de ellas debe pesar entre 390 y 445 gramos, esta carga depende de la granulometría de la muestra a ensayarse. Un anaquel que está en el interior del tambor rotatorio recoge la carga de bolas y agregado en cada revolución y la deja caer conforme se aproxima al punto más alto de su recorrido. De este modo el agregado experimenta cierta acción de frotamiento y vuelcos, así como un impacto considerable, durante las 500 revoluciones que especifica la norma.

Si los resultados de estas pruebas son negativos, no es necesario seguir con los ensayos restantes, debiéndose rechazar el agregado, siempre que la propiedad fundamental que se requiera sea la resistencia y la durabilidad.

Gráfico # 12 Máquina de abrasión de los Ángeles

Fuente: *http://es.scribd.com/doc/51906675/ENSAYO-DE-MATERIALES*

HORMIGÓN

El **hormigón** o **concreto** es el material resultante de la mezcla de cemento (u otro conglomerante) con áridos (grava, gravilla y arena) y agua. La mezcla de cemento con arena y agua se denomina mortero.

La principal característica estructural del hormigón es que resiste muy bien los esfuerzos de compresión, pero no tiene buen comportamiento frente a otros tipos de esfuerzos (tracción, flexión, cortante, etc.), por este motivo es habitual usarlo asociado al acero, recibiendo el nombre de hormigón armado.

Para conseguir propiedades especiales del hormigón (mejor trabajabilidad, mayor resistencia, baja densidad, etc.), se pueden añadir otros componentes como aditivos químicos, micro sílice, limallas de hierro, etc, o se pueden reemplazar sus componentes básicos por componentes con características especiales como agregados livianos, agregados pesados, cementos de fraguado lento, etc.
El hormigón está formado por una pasta o matriz (cemento más agua), y un material de relleno (agregados grueso y fino).

Funciones de la pasta de Hormigón:

- Llenar los vacíos que deja el árido.
- Dar plasticidad al hormigón fresco, ya que actúa como un lubricante.
- Dar resistencia al hormigón.
- Al llenar la pasta los vacíos, le da también impermeabilidad al hormigón endurecido.

CALIDAD DEL HORMIGÓN

Por lo general la aceptabilidad del hormigón se basa en ensayos a los 28 días, pero puede especificarse para cualquier otra edad, más temprana o más tardía. Los ensayos que se realizan sobre las muestras de hormigón a otras edades, diferentes

de la especificada para la aceptación del hormigón, son útiles para conocer el desarrollo de su resistencia.[32]

La primera etapa del control de calidad comienza con los componentes del hormigón: agregados grueso y fino, agua, cemento y eventualmente aditivos. Una vez que se puede asegurar que los componentes que se emplean son los apropiados, se debe asegurar que las proporciones que intervienen en la mezcla sean las que corresponden a la dosificación elegida, cualquiera sea el método empleado para dosificar y la forma de medición. Lógicamente, es preferible la medición de los mismos en peso porque se obtiene una menor variación.
En algunos casos, como cuando se emplean aditivos o se pretende un hormigón de buena calidad, la medición en peso de todos los componentes es imprescindible.

Aseguradas las proporciones de la mezcla, se debe constatar que el hormigón esté correctamente mezclado, que sea homogéneo y que presente características adecuadas en estado fresco.

Conviene entonces evaluar estas características, para lo cual se cuantifican algunas de sus propiedades, es decir, se emplean procedimientos prácticos que permiten asignar un número a esa propiedad. De esa manera se evitan los juicios subjetivos en la calificación del hormigón fresco.

El hormigón fresco debe colocarse y compactarse adecuadamente. Una vez que el hormigón está colocado y terminado, asegurándonos que no haya ondulaciones excesivas y que posea una correcta textura, se inicia la etapa de curado. Este proceso tecnológico consiste en darle al hormigón las condiciones de humedad apropiadas para posibilitar la evolución de resistencia. Es claro que el componente que evoluciona es el cemento, el que, al reaccionar con el agua, hace que la mezcla fragüe (se transforme en un sólido) y luego endurezca paulatinamente hasta alcanzar la resistencia deseada.

---

[32] *JIMENEZ MONTOYA, Pedro. " Hormigón Armado, 14 Edición Editorial, Gustavo Gili.*

Este proceso es paulatino; se acelera con altas temperaturas y se retarda con temperaturas bajas, por lo que se debe tener en cuenta este factor. Además, un correcto curado permite evitar la aparición de fisuras no deseadas. [33]

PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN

Hormigón fresco

Durante el período en que el hormigón se comporta como un líquido se lo denomina en estado fresco, siendo el producto inmediato del amasado de sus componentes. El lapso dura aproximadamente entre 1 y 3 horas.

a) Trabajabilidad (Docilidad)

Es la facilidad que tiene el hormigón para ser amasado, manipulado y puesto en obra, con los medios de compactación que se disponga, dependiendo de:

- Cantidad de agua de amasado: más agua mayor docilidad y menor resistencia.
- Contenido de árido fino: mayor contenido de arena mejor trabajabilidad, pero mientras más arena es necesario más agua de amasado y baja la resistencia.

b) Homogeneidad:

Es la cualidad por la cual los diferentes componentes del hormigón aparecen regularmente distribuidos en toda la masa.[34]

c) Consistencia

Es la mayor o menor facilidad que tiene el hormigón fresco para deformarse o adaptarse a una forma específica.

[33] *JIMÉNEZ MONTOYA, P. Hormigón Armado. 14a Edición.. Barcelona, 2001*
[34] *MEDINA, Santiago "Ensayo de Materiales II"*

d) **Peso Específico**

Ya sea compactado o sin compactar, es un índice de la uniformidad del hormigón durante la ejecución de una obra.

Hormigón Endurecido

a) **Permeabilidad**

Es el grado en que un hormigón es accesible a los líquidos o a los gases. El factor que más influye en esta propiedad es la relación entre la cantidad de agua añadida y de cemento en el hormigón

b) Dureza

Es una propiedad superficial que en el hormigón se modifica con el paso del tiempo debido al fenómeno de carbonatación. Un método de medirla es con el índice de rebote que proporciona el esclerómetro Schmidt.

c) **Resistencia a la Compresión**

Las especificaciones de hormigón exigen una resistencia a la compresión a 28 días, aunque no necesariamente es la condición dominante. Un hormigón no puede tener más resistencia a la compresión que los áridos que lo conforman.

- **Resistencia Característica:** Valor de la resistencia a la compresión del hormigón simple tal que, si se ensayan varias muestras en el laboratorio, el 95 % de las probetas tienen resistencias mayores o iguales.

- **Resistencia Media:** Es la media aritmética entre las resistencias a compresión obtenidas de varias muestras de hormigón. [35]

[35] *MEDINA, Santiago "Ensayo de Materiales II"*

2.5 HIPÓTESIS

Las Fibras de polipropileno como refuerzo en el hormigón, influyen en sus propiedades mecánicas en el Cantón Ambato, provincia de Tungurahua.

2.6 SEÑALAMIENTO DE VARIABLES

2.6.1 Variable Independiente

Las Fibras de polipropileno como refuerzo en el hormigón.

2.6.2 Variable Dependiente

Propiedades mecánicas del hormigón en el Cantón Ambato, provincia de Tungurahua.

CAPÍTULO III
METODOLOGÍA

3.1 ENFOQUE

La presente investigación posee un enfoque predominantemente cuali-cuantitativo debido a que será necesario la interpretación de datos y resultados obtenidos además se realizarán ensayos de los diferentes materiales para determinar el comportamiento del hormigón reforzado con fibras de polipropileno y su influencia en las propiedades mecánicas, siendo primordial determinar las propiedades de los agregados tanto fino como grueso para la elaboración del hormigón, el mismo que se sujetará a las normas establecidas, lo que permitirá llevar a término esta investigación con óptimos resultados.

3.2 MODALIDAD BÁSICA DE LA INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación que se empleará en este proyecto será modalidad de campo, mediante la obtención de los agregados de las diferentes canteras de la ciudad de Ambato para la elaboración de probetas de hormigón, y a su vez se desarrollará una investigación con modalidad de laboratorio y experimental debido a que se realizarán estudios y ensayos para obtener las diferentes propiedades de los agregados y además determinar la cantidad óptima de fibra de polipropileno que se debe adicionar al hormigón identificando sus propiedades mecánicas.

Se incluirá también la modalidad de investigación bibliográfica por cuanto se aplicarán las diferentes normas de construcción vigentes en el país que contemplan los requisitos para obtener una mezcla de hormigón de buena calidad al adicionar fibra.

3.3 NIVEL O TIPO DE INVESTIGACIÓN

Los niveles de investigación que se aplicarán son exploratorios y descriptivos. Esta investigación será exploratoria debido a que durante su desarrollo estaremos en busca de un fenómeno desconocido del hormigón reforzado con fibras de polipropileno y a la vez se buscará determinar qué influencia tiene sobre sus propiedades mecánicas al variar la cantidad de fibra adicionada, permitiendo abaratar costos además de obtener un hormigón de calidad con mejores propiedades y en un futuro utilizar en construcciones civiles de la ciudad de Ambato.

Esta investigación también será descriptiva porque a más de conocer las características de los agregados propios de nuestra zona, se determinará la fibra de polipropileno apta para la elaboración de hormigón estableciendo cantidades y dosificaciones adecuados útiles para futuras construcciones.

3.4 POBLACIÓN Y MUESTRA

El universo de estudio para la presente investigación estará conformado por las principales canteras que abastecen de material pétreo al centro del país debido a sus buenas características para la elaboración del hormigón, el mismo que es empleado en las diferentes construcciones civiles del Cantón Ambato, Provincia de Tungurahua.

En cuanto a la Fibra de Polipropileno para el refuerzo del hormigón, una vez analizadas las propiedades mecánicas de los agregados se determinará las características de la fibra a utilizar para el desarrollo de la investigación.

3.5 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

3.5.1 Variable Independiente

Hormigón Reforzado con Fibras de Polipropileno

Conceptualización	**Dimensiones**	**Indicadores**	**Ítems**	**Técnicas e Instrumentos**
El hormigón fibroreforzado es una combinación de cemento hidráulico, agua, áridos finos y gruesos, más fibras dispersas aleatoriamente orientadas con el fin de reforzarlo, incrementando propiedades que éste carece.	Hormigón	Calidad del Hormigón	¿Cuáles son los requerimientos que debe cumplir un hormigón de buena Calidad?	Investigación Bibliográfica Normas INEN, ASTM
		Tipos de Hormigón	¿Qué tipo de hormigón se puede fabricar en nuestro país?	Investigación de Laboratorio y Experimental
	Fibras Polipropileno	Fibra Polipropileno Monofilamento	¿Cómo influyen las características de la fibra de polipropileno en el hormigón?	Investigación de Laboratorio
		Fibra Polipropileno Multifilamento	¿Cuál es la fibra de polipropileno adecuada para el hormigón?	Investigación de Laboratorio y Experimental

Tabla # 2 Operacionalización de la Variable Independiente

3.5.2 Variable Dependiente

Propiedades del Hormigón

Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	Ítems	Técnicas e Instrumentos
Son las características y cualidades que posee el hormigón cuando se encuentra en estado fresco o endurecido, depende de la calidad de agregados y adiciones utilizados para su elaboración.	Hormigón Fresco	Trabajabilidad	¿Cómo afecta la relación agua/cemento en la trabajabilidad del hormigón?	Investigación Bibliográfica Normas INEN, ASTM
		Consistencia	¿Cuál es el método más apropiado para determinar el asentamiento del hormigón?	Investigación de Laboratorio
	Hormigón Endurecido	Resistencia	¿Cómo influye la calidad de los agregados en la resistencia del hormigón?	Investigación Bibliográfica Normas INEN, ASTM Investigación de Laboratorio
		Durabilidad	¿Cuál es la vida útil del hormigón y de qué depende?	Investigación Bibliográfica Normas INEN, ASTM

Tabla # 3 Operacionalización de la Variable Dependiente

3.6 PLAN DE RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN

Preguntas Básicas	Explicación
1. ¿Para qué?	- Determinar el comportamiento del hormigón reforzado con fibras de polipropileno y su influencia en sus propiedades mecánicas en el Cantón Ambato, Provincia de Tungurahua. - Analizar el comportamiento del hormigón reforzado con fibras de polipropileno aptos para las construcciones civiles de la ciudad de Ambato.
2. ¿De qué personas u objetos?	- Agregados de la planta de Trituración de Áridos localizada en el sector Las Viñas. - Muestras de fibra de polipropileno
3. ¿Sobre qué aspectos?	- Comportamiento del hormigón Reforzado con Fibras de Polipropileno - Influencia en las propiedades del Hormigón
4. ¿Quién?	- El Investigador
5. ¿Dónde?	- Laboratorio de Ensayo de Materiales y Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Técnica de Ambato.
6. ¿Cómo se recolecta la información?	- Mediante pruebas y ensayos de laboratorio - Investigaciones Bibliográficas en Normas INEN-ASTM

Tabla # 4 Plan de Recolección de la Información

3.6.1 Técnicas e Instrumentos

Técnicas	Instrumentos
Ensayos de Laboratorio	- Herramienta Menor - Moldes para elaboración de cilindros de hormigón - Máquina de Compresión (250000 lb) - Cámara de Curado

Tabla # 5 Técnicas e Instrumentos

3.7 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS

3.7.1 Plan de Procesamiento de la Información

- Revisión crítica de la información recogida; es decir limpieza de información defectuosa: contradictoria, incompleta, no pertinente, etc.

- Tabulación o cuadros según variables de la hipótesis: manejo de información,

- Representar los resultados mediante gráficos estadísticos.

3.7.2 Plan de Análisis e Interpretación de Resultados

- Analizar e interpretar los resultados relacionándolos con las diferentes partes de la investigación, especialmente con los objetivos y la hipótesis.

- Comprobación de la Hipótesis dependiendo de los resultados obtenidos en la investigación

- Establecimiento de conclusiones y recomendaciones

CAPÍTULO IV
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Para el desarrollo de este capítulo se tomaron como referencia los estudios y ensayos de laboratorio de los agregados (grueso y fino) realizados en la FICM por el Egdo. Alberto Ortega en su tesis ***"La calidad de los agregados de tres canteras de la ciudad de Ambato y su influencia en la resistencia del hormigón empleado en la construcción de obras civiles".***

El cemento a utilizarse en esta investigación será en base a la Norma NTE INEN 152[36], de TIPO IP.

4.1.1 Ensayos Realizados en los Agregados

A continuación se detallan los ensayos realizados en los agregados.

ENSAYOS	AGREGADO GRUESO	AGREGADO FINO
Análisis Granulométrico	x	x
Peso Unitario Suelto	x	x
Peso Unitario Compactado	x	x
Peso Específico	x	x
Capacidad de Absorción	x	x
Resistencia al Desgaste	x	-

Tabla # 6 Ensayos Realizados Agregado Grueso y Fino

[36] *NTE INEN 152: Cemento Portland. Requisitos*

CANTERA VILLACRÉS

Tabla # 7 Granulometría Agregado Grueso (Cantera Villacrés)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO					
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA					
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL					
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA					
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO GRUESO					
ORIGEN:		Cantera Villacrés			
PESO DE LA MUESTRA (gr.):		10000	PÉRDIDA DE MUESTRA (%)		0,7
ENSAYADO POR:		Egdo. Alberto Ortega	FECHA:	05/01/2013	
NORMA:		INEN 696			
TAMIZ	RETENIDO PARCIAL (gr)	RETENIDO ACUMULADO (gr.)	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA	LÍMITES ASTM % QUE PASA
2"	0,0	0,0	0,0	100,0	100
1 1/2"	0,0	0,0	0,0	100,0	95 --- 100
1"	1717,6	1717,6	17,2	82,8	-
3/4"	2050,4	3768	37,7	62,3	35 --- 70
1/2"	1560,5	5328,5	53,3	46,7	-
3/8"	2952,3	8280,8	82,8	17,2	10 --- 30
#4	1523,6	9804,4	98,0	2,0	0 --- 5
BANDEJA	125,8	9930,2	99,3	0,7	-
TAMAÑO NOMINAL MÁXIMO:			1 1/2"		

***Fuente**: ORTEGA A. "La calidad de los agregados de tres canteras de la ciudad de Ambato y su influencia en la resistencia del hormigón empleado en la construcción de obras civiles". Tesis de Grado de la FICM - UTA, pp. 41, Ambato, (2013).*

CANTERA VILLACRÉS

Tabla # 8 Granulometría Agregado Fino (Cantera Villacrés)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO					
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA					
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL					
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA					
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO FINO					
ORIGEN:		Cantera Villacrés			
PESO DE LA MUESTRA (gr.):		700	**PÉRDIDA DE MUESTRA (%)**		0,5
ENSAYADO POR:		Egdo. Alberto Ortega	**FECHA:**	14/01/2013	
NORMA:		INEN 696			
TAMIZ	**RETENIDO PARCIAL (gr)**	**RETENIDO ACUMULADO (gr.)**	**% RETENIDO ACUMULADO**	**% QUE PASA**	**LÍMITES ASTM % QUE PASA**
3/8"	0,0	0,0	0,0	100,0	100
#4	12,0	12,0	1,7	100,0	95 --- 100
#8	156,9	168,9	24,1	75,9	80 --- 100
#16	106,2	275,1	39,3	60,7	50 --- 85
#30	104,9	380,0	54,3	45,7	25 --- 60
#50	213,2	593,2	84,7	15,3	10 --- 30
#100	80,3	673,5	96,2	3,8	2 --- 10
#200	19,0	692,5	98,9	1,1	-
BANDEJA	4,3	696,8	99,5	-	-
MÓDULO DE FINURA			3,0		

% QUE PASA: 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100

0,01 0,10 1,00 10,00

ABERTURA TAMIZ (mm)

LÍMITE SUPERIOR — LÍMITE INFERIOR — %ACUMULADO

***Fuente**: ORTEGA A. "La calidad de los agregados de tres canteras de la ciudad de Ambato y su influencia en la resistencia del hormigón empleado en la construcción de obras civiles". Tesis de Grado de la FICM - UTA, pp. 42, Ambato, (2013).*

CANTERA VILLACRÉS

Tabla # 9 Peso Unitario Suelto del Agregado Grueso y Agregado Fino (Cantera Villacrés)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO				
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA				
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL				
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA				
PESO UNITARIO SUELTO DEL AGREGADO GRUESO Y AGREGADO FINO				
ORIGEN:	Cantera Villacrés			
ENSAYADO POR:	Egdo. Alberto Ortega	**FECHA:**	05/01/2013	
NORMA:	INEN 858			
MASA RECIPIENTE (kg.):	9,90			
VOLUMEN RECIPIENTE (dm3):	20,445			
AGREGADO	**AGREGADO + RECIPIENTE (kg.)**	**AGREGADO (kg.)**	**PESO UNITARIO kg/dm3**	**PESO UNITARIO PROMEDIO kg/dm3**
GRUESO	38,0	28,1	1,374	1,382
	38,3	28,4	1,389	
FINO	36,8	26,9	1,316	1,326
	37,2	27,3	1,335	

Tabla # 10 Peso Unitario Compactado Agregado Grueso y Agregado Fino (Cantera Villacrés)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO				
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA				
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL				
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA				
PESO UNITARIO COMPACTADO DEL AGREGADO GRUESO Y AGREGADO FINO				
ORIGEN:	Cantera Villacrés			
ENSAYADO POR:	Egdo. Alberto Ortega	**FECHA:**	05/01/2013	
NORMA:	INEN 858			
MASA RECIPIENTE (kg.):	9,90			
VOLUMEN RECIPIENTE (dm3):	20,445			
AGREGADO	**AGREGADO + RECIPIENTE (kg.)**	**AGREGADO (kg.)**	**PESO UNITARIO kg/dm3**	**PESO UNITARIO PROMEDIO kg/dm3**
GRUESO	41,8	31,9	1,560	1,558
	41,7	31,8	1,555	
FINO	42,0	32,1	1,570	1,565
	41,8	31,9	1,560	

***Fuente**: ORTEGA A. "La calidad de los agregados de tres canteras de la ciudad de Ambato y su influencia en la resistencia del hormigón empleado en la construcción de obras civiles". Tesis de Grado de la FICM - UTA, pp. 43, Ambato, (2013).*

CANTERA VILLACRÉS

Tabla # 11 Peso Unitario Compactado de la Mezcla (Cantera Villacrés)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO								
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA								
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL								
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA								
PESO UNITARIO COMPACTADO DE LA MEZCLA								
ORIGEN:		Cantera Villacrés						
ENSAYADO POR:		Egdo. Alberto Ortega			FECHA:	12/01/2013		
NORMA:		INEN 858						
MASA RECIPIENTE (kg.):		9,90						
VOLUMEN RECIPIENTE (dm3):		20,445						
% MEZCLA		CANTIDAD (kg.)		FINO AÑADIDO (kg.)	AGREGADO + RECIPIENTE (kg.)	AGREGADO (kg.)	PESO UNITARIO MEZCLA kg/dm3	PESO UNITARIO PROMEDIO kg/dm3
R	A	R	A	A	AGREGADO FINO + AGREGADO GRUESO			
100	0	40	0,00	0,00	41,8	31,9	1,560	1,558
					41,7	31,8	1,555	
90	10	40	4,44	4,44	44,5	34,6	1,692	1,695
					44,6	34,7	1,697	
80	20	40	10,00	5,56	46,3	36,4	1,780	1,805
					47,3	37,4	1,829	
70	30	40	17,14	7,14	48,5	38,6	1,888	1,886
					48,4	38,5	1,883	
60	40	40	26,67	9,53	48,3	38,4	1,878	1,873
					48,1	38,2	1,868	
50	50	40	40,00	13,33	48,1	38,2	1,868	1,866
					48,0	38,1	1,864	
40	60	40	60,00	20,00	47,6	37,7	1,844	1,849
					47,8	37,9	1,854	

DENSIDAD APARENTE PROMEDIO (kg/cm3)
2,000
1,900
1,800
1,700
1,600
1,500
1.893
1.890
A. FINO 0 10 20 30 40 50 60 70
39 POA
43 PMA
PORCENTAJE ÓPTIMO DE LA MEZCLA %
DENSIDAD ÓPTIMA DE LOS AGREGADOS

PORCENTAJE MÁXIMO DE AGREGADO FINO	43	%
PORCENTAJE MÁXIMO DE AGREGADO GRUESO	57	%
PORCENTAJE ÓPTIMO DE AGREGADO FINO	39	%
PORCENTAJE ÓPTIMO DE AGREGADO GRUESO	61	%
PESO UNITARIO MÁXIMO	1,893	gr./cm3
PESO UNITARIO ÓPTIMO	1,890	gr./cm3

***Fuente**: ORTEGA A. “La calidad de los agregados de tres canteras de la ciudad de Ambato y su influencia en la resistencia del hormigón empleado en la construcción de obras civiles”. Tesis de Grado de la FICM - UTA, pp. 44, Ambato, (2013).*

CANTERA VILLACRÉS

Tabla # 12 Densidad Real y Capacidad de Absorción del Agregado Grueso (Cantera Villacrés)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO				
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA				
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL				
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA				
DENSIDAD REAL Y CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO				
ORIGEN:	Cantera Villacrés			
ENSAYADO POR:	Egdo. Alberto Ortega	**FECHA:**	19/01/2013	
NORMA:	INEN 857			
DATO	**CORRESPONDENCIA**	**UNIDAD**	**VALOR**	
CÁLCULO DE LA DENSIDAD REAL DEL RIPIO				
M1	MASA DE LA CANASTILLA EN EL AIRE	**gr.**	1795	
M2	MASA DE LA CANASTILLA EN EL AGUA	**gr.**	1505	
M3	MASA DE LA CANASTILLA + MUESTRA S.S.S. EN EL AIRE	**gr.**	10195	
M4	MASA DE LA CANASTILLA + MUESTRA S.S.S. EN EL AGUA	**gr.**	6655	
DA	DENSIDAD REAL DEL AGUA	**gr./cm3**	1,000	
M5 = M3 - M1	MASA DE LA MUESTRA S.S.S. EN EL AIRE	**gr.**	8400	
M6 = M4 - M2	MASA DE LA MUESTRA S.S.S. EN EL AGUA	**gr.**	5150	
VR = (M5-M6) / DA	VOLUMEN REAL DE LA MUESTRA	**cm3**	3250	
DR = M5 / VR	DENSIDAD REAL DEL RIPIO	**gr./cm3**	2,585	
CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE ABSORCIÒN DEL RIPIO				
M7	MASA DEL RECIPIENTE	**gr.**	30,9	30,5
M8	MASA DEL RECIPIENTE + MUESTRA S.S.S.	**gr.**	614,9	618,2
M9 = M8 - M7	MASA DE LA MUESTRA S.S.S.	**gr.**	584,0	587,7
M10	MASA DEL RECIPIENTE + MUESTRA SECA	**gr.**	594,8	597,1
M11 = M10 - M7	MASA DE LA MUESTRA SECA	**gr.**	563,9	566,6
CA = ((M9 - M11)/M11)*100	CAPACIDAD DE ABSORCIÓN	**%**	3,56	3,72
P2 = (CA1 + CA2) / 2	CAPACIDAD DE ABSORCIÓN PROMEDIO DEL RIPIO	**%**	3,64	

***Fuente**: ORTEGA A. "La calidad de los agregados de tres canteras de la ciudad de Ambato y su influencia en la resistencia del hormigón empleado en la construcción de obras civiles". Tesis de Grado de la FICM - UTA, pp. 45, Ambato, (2013).*

CANTERA VILLACRÉS

Tabla # 13 Densidad Real y Capacidad de Absorción del Agregado Fino (Cantera Villacrés)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO				
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA				
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL				
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA				
DENSIDAD REAL Y CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO				
ORIGEN:	Cantera Villacrés			
ENSAYADO POR:	Egdo. Alberto Ortega **FECHA:** 19/01/2013			
NORMA:	INEN 856			
DATO	**CORRESPONDENCIA**	**UNIDAD**	**VALOR 1**	
CÁLCULO DE LA DENSIDAD REAL DE LA ARENA				
M1	MASA DEL PICNÓMETRO	**gr.**	163,3	
M2	MASA DEL PICNÓMETRO + MUESTRA S.S.S.	**gr.**	460,1	
M3	MASA DEL PICNÓMETRO + MUESTRA S.S.S. + AGUA	**gr.**	841,9	
M4 = M3 - M2	MASA AGUA AÑADIDA	**gr.**	381,8	
M5	MASA PICNÓMETRO + 500 cm3 DE AGUA	**gr.**	659,9	
M6 = M5 - M1	MASA DE 500 cm3 DE AGUA	**gr.**	496,6	
DA = M6 / 500 cm3	DENSIDAD DEL AGUA	**gr./cm3**	0,9932	
M7 = M6 - M4	MASA DE AGUA DESALOJADA POR LA MUESTRA	**gr.**	114,8	
Msss = M2 - M1	MASA DEL AGREGADO	**gr.**	296,8	
Vsss = M7 / DA	VOLUMEN DE AGUA DESALOJADA	**cm3**	115,6	
DRA = Msss / Vsss	DENSIDAD REAL DE LA ARENA	**gr./cm3**	2,568	
CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE LA ARENA				
M7	MASA DEL RECIPIENTE	**gr.**	32,0	31,3
M8	MASA DEL RECIPIENTE + MUESTRA S.S.S.	**gr.**	83,8	86,0
M9 = M8 - M7	MASA DE LA MUESTRA S.S.S.	**gr.**	51,8	54,7
M10	MASA DEL RECIPIENTE + MUESTRA SECA	**gr.**	83,2	85,3
M11 = M10 - M7	MASA DE LA MUESTRA SECA	**gr.**	51,2	54
CA = ((M9 - M11)/M11)*100	CAPACIDAD DE ABSORCIÓN	**%**	1,17	1,30
P2 = (CA1 + CA2) / 2	CAPACIDAD DE ABSORCIÓN PROMEDIO DEL ARENA	**%**	1,23	

***Fuente**: ORTEGA A. "La calidad de los agregados de tres canteras de la ciudad de Ambato y su influencia en la resistencia del hormigón empleado en la construcción de obras civiles". Tesis de Grado de la FICM - UTA, pp. 46, Ambato, (2013).*

CANTERA VILLACRÉS

Tabla # 14 Resistencia al Desgaste - Prueba de los Ángeles Agregado Grueso (Cantera Villacrés)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO				
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA				
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL				
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA				
RESISTENCIA AL DESGASTE - PRUEBA DE LOS ÁNGELES AGREGADO GRUESO				
ORIGEN:	Cantera Villacrés			
ENSAYADO POR:	Egdo. Alberto Ortega	**FECHA:**	18/01/2013	
NORMA:	INEN 860			
ENUNCIADO		**UNIDAD**	**M1**	**M2**
PESO DE LA MUESTRA ANTES DEL ENSAYO		gr.	5000,0	5000,0
PESO MUESTRA DESPUÉS DEL ENSAYO RET. # 12		gr.	2899,7	2850,4
PESO MUESTRA PASA # 12		gr.	2100,3	2149,6
% DESGASTE		%	42,006	42,99
PROMEDIO		%	42,5	

***Fuente**: ORTEGA A. "La calidad de los agregados de tres canteras de la ciudad de Ambato y su influencia en la resistencia del hormigón empleado en la construcción de obras civiles". Tesis de Grado de la FICM - UTA, pp. 47, Ambato, (2013).*

Tabla # 15 Granulometría Agregado Grueso
(Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO					
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA					
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL					
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA					
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO GRUESO					
ORIGEN:		Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias			
PESO DE LA MUESTRA (gr.):		10000	**PÉRDIDA DE MUESTRA (%)**		0,2
ENSAYADO POR:		Egdo. Alberto Ortega	**FECHA:**	16/01/2013	
NORMA:		INEN 696			
TAMIZ	**RETENIDO PARCIAL (gr)**	**RETENIDO ACUMULADO (gr.)**	**% RETENIDO ACUMULADO**	**% QUE PASA**	**LÍMITES ASTM % QUE PASA**
2"	0,0	0,0	0,0	100,0	100
1 1/2"	375,5	375,5	3,8	96,2	95 --- 100
1"	1055,2	1430,7	14,3	85,7	-
3/4"	2532,8	3963,5	39,6	60,4	35 --- 70
1/2"	3225,3	7188,8	71,9	28,1	-
3/8"	1696,1	8884,9	88,8	11,2	10 --- 30
#4	940,2	9825,1	98,3	1,7	0 --- 5
BANDEJA	154,5	9979,6	99,8	-	-
TAMAÑO NOMINAL MÁXIMO:			1"		

% QUE PASA

ABERTURA TAMIZ (mm)

LÍMITE SUPERIOR — LÍMITE INFERIOR — %ACUMULADO

Fuente: *ORTEGA A. "La calidad de los agregados de tres canteras de la ciudad de Ambato y su influencia en la resistencia del hormigón empleado en la construcción de obras civiles". Tesis de Grado de la FICM - UTA, pp. 49, Ambato, (2013).*

Tabla # 16 Granulometría Agregado Fino
(Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO					
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA					
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL					
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA					
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO FINO					
ORIGEN:		Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias			
PESO DE LA MUESTRA (gr.):		700	**PÉRDIDA DE MUESTRA (%)**		0,2
ENSAYADO POR:		Egdo. Alberto Ortega	**FECHA:**	14/01/2013	
NORMA:		INEN 696			
TAMIZ	**RETENIDO PARCIAL (gr)**	**RETENIDO ACUMULADO (gr.)**	**% RETENIDO ACUMULADO**	**% QUE PASA**	**LÍMITES ASTM % QUE PASA**
3/8"	0,0	0,0	0,0	100,0	100
#4	4,6	4,6	0,7	100,0	95 --- 100
#8	86	90,6	12,9	87,1	80 --- 100
#16	179,7	270,3	38,6	61,4	50 --- 85
#30	173,1	443,4	63,3	36,7	25 --- 60
#50	152,6	596,0	85,1	14,9	10 --- 30
#100	52,9	648,9	92,7	7,3	2 --- 10
#200	27,6	676,5	96,6	3,4	-
BANDEJA	22,0	698,5	99,8	-	-
MÓDULO DE FINURA			2,9		

***Fuente**: ORTEGA A. "La calidad de los agregados de tres canteras de la ciudad de Ambato y su influencia en la resistencia del hormigón empleado en la construcción de obras civiles". Tesis de Grado de la FICM - UTA, pp. 50, Ambato, (2013).*

PLANTA DE TRITURACIÓN DE ÁRIDOS CONSTRUCTORA ARIAS

Tabla # 17 Peso Unitario Suelto del Agregado Grueso y Agregado Fino (Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO				
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA				
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL				
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA				
PESO UNITARIO SUELTO DEL AGREGADO GRUESO Y AGREGADO FINO				
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias			
ENSAYADO POR:	Egdo. Alberto Ortega	**FECHA:**	05/01/2013	
NORMA:	INEN 858			
MASA RECIPIENTE (kg.):	9,90			
VOLUMEN RECIPIENTE (dm3):	20,25			
AGREGADO	**AGREGADO + RECIPIENTE (kg.)**	**AGREGADO (kg.)**	**PESO UNITARIO kg/dm3**	**PESO UNITARIO PROMEDIO kg/dm3**
GRUESO	36,5	26,6	1,314	1,306
	36,2	26,3	1,299	
FINO	36,5	26,6	1,314	1,316
	36,6	26,7	1,319	

Tabla # 18 Peso Unitario Compactado Agregado Grueso y Agregado Fino (Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO				
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA				
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL				
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA				
PESO UNITARIO COMPACTADO DEL AGREGADO GRUESO Y AGREGADO FINO				
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias			
ENSAYADO POR:	Egdo. Alberto Ortega	**FECHA:**	05/01/2013	
NORMA:	INEN 858			
MASA RECIPIENTE (kg.):	9,90			
VOLUMEN RECIPIENTE (dm3):	20,25			
AGREGADO	**AGREGADO + RECIPIENTE (kg.)**	**AGREGADO (kg.)**	**PESO UNITARIO kg/dm3**	**PESO UNITARIO PROMEDIO kg/dm3**
GRUESO	41,8	31,9	1,575	1,583
	42,1	32,2	1,590	
FINO	41,4	31,5	1,556	1,560
	41,6	31,7	1,565	

***Fuente**: ORTEGA A. "La calidad de los agregados de tres canteras de la ciudad de Ambato y su influencia en la resistencia del hormigón empleado en la construcción de obras civiles". Tesis de Grado de la FICM - UTA, pp. 51, Ambato, (2013).*

Tabla # 19 Peso Unitario Compactado de la Mezcla (Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO								
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA								
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL								
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA								
PESO UNITARIO COMPACTADO DE LA MEZCLA								
ORIGEN:		Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias						
ENSAYADO POR:		Egdo. Alberto Ortega			FECHA:	12/01/2013		
NORMA:		INEN 858						
MASA RECIPIENTE (kg.):		9,90						
VOLUMEN RECIPIENTE (dm3):		20,25						
% MEZCLA		CANTIDAD (kg.)		FINO AÑADIDO (kg.)	AGREGADO + RECIPIENTE (kg.)	AGREGADO (kg.)	PESO UNITARIO MEZCLA kg/dm3	PESO UNITARIO PROMEDIO kg/dm3
R	A	R	A	A	AGREGADO FINO + AGREGADO GRUESO			
100	0	40	0,00	0,00	41,8	31,9	1,575	1,583
					42,1	32,2	1,590	
90	10	40	4,44	4,44	44,3	34,4	1,699	1,701
					44,4	34,5	1,704	
80	20	40	10,00	5,56	47,0	37,1	1,832	1,820
					46,5	36,6	1,807	
70	30	40	17,14	7,14	48,5	38,6	1,906	1,884
					47,6	37,7	1,862	
60	40	40	26,67	9,53	47,8	37,9	1,872	1,879
					48,1	38,2	1,886	
50	50	40	40,00	13,33	47,9	38,0	1,877	1,874
					47,8	37,9	1,872	
40	60	40	60,00	20,00	46,7	36,8	1,817	1,817
					46,7	36,8	1,817	

PORCENTAJE MÁXIMO DE AGREGADO FINO	40	%
PORCENTAJE MÁXIMO DE AGREGADO GRUESO	60	%
PORCENTAJE ÓPTIMO DE AGREGADO FINO	36	%
PORCENTAJE ÓPTIMO DE AGREGADO GRUESO	64	%
PESO UNITARIO MÁXIMO	1,891	gr./cm3
PESO UNITARIO ÓPTIMO	1,888	gr./cm3

***Fuente**: ORTEGA A. "La calidad de los agregados de tres canteras de la ciudad de Ambato y su influencia en la resistencia del hormigón empleado en la construcción de obras civiles". Tesis de Grado de la FICM - UTA, pp. 52, Ambato, (2013)*

Tabla # 20 Densidad Real y Capacidad de Absorción del Agregado Grueso (Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO				
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA				
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL				
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA				
DENSIDAD REAL Y CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO				
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias			
ENSAYADO POR:	Egdo. Alberto Ortega	**FECHA:**	19/01/2013	
NORMA:	INEN 857			
DATO	**CORRESPONDENCIA**	**UNIDAD**	**VALOR 1**	
CÁLCULO DE LA DENSIDAD REAL DEL RIPIO				
M1	MASA DE LA CANASTILLA EN EL AIRE	**gr.**	1795	
M2	MASA DE LA CANASTILLA EN EL AGUA	**gr.**	1505	
M3	MASA DE LA CANASTILLA + MUESTRA S.S.S. EN EL AIRE	**gr.**	13520	
M4	MASA DE LA CANASTILLA + MUESTRA S.S.S. EN EL AGUA	**gr.**	8740	
DA	DENSIDAD REAL DEL AGUA	**gr./cm3**	1,000	
M5 = M3 - M1	MASA DE LA MUESTRA S.S.S. EN EL AIRE	**gr.**	11725	
M6 = M4 - M2	MASA DE LA MUESTRA S.S.S. EN EL AGUA	**gr.**	7235	
VR = (M5-M6) / DA	VOLUMEN REAL DE LA MUESTRA	**cm3**	4490	
DR = M5 / VR	DENSIDAD REAL DEL RIPIO	**gr./cm3**	2,611	
CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE ABSORCIÒN DEL RIPIO				
M7	MASA DEL RECIPIENTE	**gr.**	140,4	137,9
M8	MASA DEL RECIPIENTE + MUESTRA S.S.S.	**gr.**	620,8	619,4
M9 = M8 - M7	MASA DE LA MUESTRA S.S.S.	**gr.**	480,4	481,5
M10	MASA DEL RECIPIENTE + MUESTRA SECA	**gr.**	602,1	598,8
M11 = M10 - M7	MASA DE LA MUESTRA SECA	**gr.**	461,7	460,9
CA = ((M9 - M11)/M11)*100	CAPACIDAD DE ABSORCIÓN	**%**	4,050	4,470
P2 = (CA1 + CA2) / 2	CAPACIDAD DE ABSORCIÓN PROMEDIO DEL RIPIO	**%**	4,260	

***Fuente**: ORTEGA A. "La calidad de los agregados de tres canteras de la ciudad de Ambato y su influencia en la resistencia del hormigón empleado en la construcción de obras civiles". Tesis de Grado de la FICM - UTA, pp. 53, Ambato, (2013).*

PLANTA DE TRITURACIÓN DE ÁRIDOS CONSTRUCTORA ARIAS

Tabla # 21 Densidad Real y Capacidad de Absorción del Agregado Fino (Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO				
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA				
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL				
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA				
DENSIDAD REAL Y CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO				
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias			
ENSAYADO POR:	Egdo. Alberto Ortega	**FECHA:**	19/01/2013	
NORMA:	INEN 856			
DATO	**CORRESPONDENCIA**	**UNIDAD**	**VALOR 1**	
CÁLCULO DE LA DENSIDAD REAL DE LA ARENA				
M1	MASA DEL PICNÓMETRO	**gr.**	163,3	
M2	MASA DEL PICNÓMETRO + MUESTRA S.S.S.	**gr.**	377,8	
M3	MASA DEL PICNÓMETRO + MUESTRA S.S.S. + AGUA	**gr.**	793,2	
M4 = M3 - M2	MASA AGUA AÑADIDA	**gr.**	415,4	
M5	MASA PICNÓMETRO + 500 cm3 DE AGUA	**gr.**	659,9	
M6 = M5 - M1	MASA DE 500 cm3 DE AGUA	**gr.**	496,6	
DA = M6 / 500 cm3	DENSIDAD DEL AGUA	**gr./cm3**	0,993	
M7 = M6 - M4	MASA DE AGUA DESALOJADA POR LA MUESTRA	**gr.**	81,2	
Msss = M2 - M1	MASA DEL AGREGADO	**gr.**	214,5	
Vsss = M7 / DA	VOLUMEN DE AGUA DESALOJADA	**cm3**	81,8	
DRA = Msss / Vsss	DENSIDAD REAL DE LA ARENA	**gr./cm3**	2,624	
CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE LA ARENA				
M7	MASA DEL RECIPIENTE	**gr.**	31,7	32,2
M8	MASA DEL RECIPIENTE + MUESTRA S.S.S.	**gr.**	75,8	79,6
M9 = M8 - M7	MASA DE LA MUESTRA S.S.S.	**gr.**	44,1	47,4
M10	MASA DEL RECIPIENTE + MUESTRA SECA	**gr.**	75,2	79,1
M11 = M10 - M7	MASA DE LA MUESTRA SECA	**gr.**	43,5	46,9
CA = ((M9 - M11)/M11)*100	CAPACIDAD DE ABSORCIÓN	**%**	1,38	1,07
P2 = (CA1 + CA2) / 2	CAPACIDAD DE ABSORCIÓN PROMEDIO DEL ARENA	**%**	1,22	

***Fuente**: ORTEGA A. "La calidad de los agregados de tres canteras de la ciudad de Ambato y su influencia en la resistencia del hormigón empleado en la construcción de obras civiles". Tesis de Grado de la FICM - UTA, pp. 54, Ambato, (2013).*

PLANTA DE TRITURACIÓN DE ÁRIDOS CONSTRUCTORA ARIAS

Tabla # 22 Resistencia al Desgaste - Prueba de los Ángeles Agregado Grueso (Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO				
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA				
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL				
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA				
RESISTENCIA AL DESGASTE - PRUEBA DE LOS ÁNGELES AGREGADO GRUESO				
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias			
ENSAYADO POR:	Egdo. Alberto Ortega	**FECHA:**	18/01/2013	
NORMA:	INEN 860			
ENUNCIADO		**UNIDAD**	**M1**	**M2**
PESO DE LA MUESTRA ANTES DEL ENSAYO		gr.	5000,0	5000,0
PESO MUESTRA DESPUÉS DEL ENSAYO RET. # 12		gr.	3055,1	3003,5
PESO MUESTRA PASA # 12		gr.	1944,9	1996,5
% DESGASTE		%	38,898	39,93
PROMEDIO		%	39,41	

***Fuente**: ORTEGA A. "La calidad de los agregados de tres canteras de la ciudad de Ambato y su influencia en la resistencia del hormigón empleado en la construcción de obras civiles". Tesis de Grado de la FICM - UTA, pp. 55, Ambato, (2013).*

CANTERA PLAYA LLAGCHOA

Tabla # 23 Granulometría Agregado Grueso (Cantera Playa Llagchoa)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO					
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA					
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL					
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA					
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO GRUESO					
ORIGEN:		Cantera Playa Llagchoa			
PESO DE LA MUESTRA (gr.):		10000	**PÉRDIDA DE MUESTRA (%)**		0,3
ENSAYADO POR:		Egdo. Alberto Ortega	**FECHA:**	15/01/2013	
NORMA:		INEN 696			
TAMIZ	**RETENIDO PARCIAL (gr)**	**RETENIDO ACUMULADO (gr.)**	**% RETENIDO ACUMULADO**	**% QUE PASA**	**LÍMITES ASTM % QUE PASA**
2"	0,0	0,0	0,0	100,0	100
1 1/2"	90,3	90,3	0,9	99,1	95 --- 100
1"	1535,4	1625,7	16,3	83,7	-
3/4"	2473,3	4099,0	41,0	59,0	35 --- 70
1/2"	2546,6	6645,6	66,5	33,5	-
3/8"	2400,3	9045,9	90,5	9,5	10 --- 30
#4	774,2	9820,1	98,2	1,8	0 --- 5
BANDEJA	154,2	9974,3	99,7	-	-
TAMAÑO NOMINAL MÁXIMO:			1 1/2"		

***Fuente**: ORTEGA A. "La calidad de los agregados de tres canteras de la ciudad de Ambato y su influencia en la resistencia del hormigón empleado en la construcción de obras civiles". Tesis de Grado de la FICM - UTA, pp. 57, Ambato, (2013).*

CANTERA PLAYA LLAGCHOA

Tabla # 24 Granulometría Agregado Fino (Cantera Playa Llagchoa)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO					
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA					
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL					
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA					
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO FINO					
ORIGEN:		Cantera Playa Llagchoa			
PESO DE LA MUESTRA (gr.):		700	**PÉRDIDA DE MUESTRA (%)**		0,4
ENSAYADO POR:		Egdo. Alberto Ortega	**FECHA:**	15/01/2013	
NORMA:		INEN 696			
TAMIZ	**RETENIDO PARCIAL (gr)**	**RETENIDO ACUMULADO (gr.)**	**% RETENIDO ACUMULADO**	**% QUE PASA**	**LÍMITES ASTM % QUE PASA**
3/8"	0,0	0,0	0,0	100,0	100
#4	27,3	27,3	3,9	96,1	95 --- 100
#8	96,7	124,0	17,7	82,3	80 --- 100
#16	102,8	226,8	32,4	67,6	50 --- 85
#30	108,0	334,8	47,8	52,2	25 --- 60
#50	141,5	476,3	68,0	32,0	10 --- 30
#100	143,6	619,9	88,6	11,4	2 --- 10
#200	50,3	670,2	95,7	4,3	-
BANDEJA	27,2	697,4	99,6	-	-
MÓDULO DE FINURA			2,5		

***Fuente**: ORTEGA A. "La calidad de los agregados de tres canteras de la ciudad de Ambato y su influencia en la resistencia del hormigón empleado en la construcción de obras civiles". Tesis de Grado de la FICM - UTA, pp. 58, Ambato, (2013).*

CANTERA PLAYA LLAGCHOA

Tabla # 25 Peso Unitario Suelto del Agregado Grueso y Agregado Fino (Cantera Playa Llagchoa)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO				
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA				
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL				
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA				
PESO UNITARIO SUELTO DEL AGREGADO GRUESO Y AGREGADO FINO				
ORIGEN:	Cantera Playa Llagchoa			
ENSAYADO POR:	Egdo. Alberto Ortega	FECHA:	12/01/2013	
NORMA:	INEN 858			
MASA RECIPIENTE (kg.):	9,90			
VOLUMEN RECIPIENTE (dm3):	20,25			
AGREGADO	AGREGADO + RECIPIENTE (kg.)	AGREGADO (kg.)	PESO UNITARIO kg/dm3	PESO UNITARIO PROMEDIO kg/dm3
GRUESO	37,9	28,0	1,383	1,395
	38,4	28,5	1,407	
FINO	36,0	26,1	1,289	1,306
	36,7	26,8	1,323	

Tabla # 26 Peso Unitario Compactado Agregado Grueso y Agregado Fino (Cantera Playa Llagchoa)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO				
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA				
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL				
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA				
PESO UNITARIO COMPACTADO DEL AGREGADO GRUESO Y AGREGADO FINO				
ORIGEN:	Cantera Playa Llagchoa			
ENSAYADO POR:	Egdo. Alberto Ortega	FECHA:	12/01/2013	
NORMA:	INEN 858			
MASA RECIPIENTE (kg.):	9,90			
VOLUMEN RECIPIENTE (dm3):	20,25			
AGREGADO	AGREGADO + RECIPIENTE (kg.)	AGREGADO (kg.)	PESO UNITARIO kg/dm3	PESO UNITARIO PROMEDIO kg/dm3
GRUESO	41,3	31,4	1,551	1,551
	41,3	31,4	1,551	
FINO	40,8	30,9	1,526	1,531
	41,0	31,1	1,536	

***Fuente**: ORTEGA A. “La calidad de los agregados de tres canteras de la ciudad de Ambato y su influencia en la resistencia del hormigón empleado en la construcción de obras civiles”. Tesis de Grado de la FICM - UTA, pp. 59, Ambato, (2013).*

CANTERA PLAYA LLAGCHOA

Tabla # 27 Peso Unitario Compactado de Mezcla (Cantera Playa Llagchoa)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO								
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA								
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL								
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA								
PESO UNITARIO COMPACTADO DE LA MEZCLA								
ORIGEN:		Cantera Playa Llagchoa						
ENSAYADO POR:		Egdo. Alberto Ortega			**FECHA:**	12/01/2013		
NORMA:		INEN 858						
MASA RECIPIENTE (kg.):		9,90						
VOLUMEN RECIPIENTE (dm3):		20,25						
% MEZCLA		**CANTIDAD (kg.)**		**FINO AÑADIDO (kg.)**	**AGREGADO + RECIPIENTE (kg.)**	**AGREGADO (kg.)**	**PESO UNITARIO MEZCLA kg/dm3**	**PESO UNITARIO PROMEDIO kg/dm3**
R	**A**	**R**	**A**	**A**	**AGREGADO FINO + AGREGADO GRUESO**			
100	**0**	40	0,00	0,00	41,3	31,4	1,551	1,551
					41,3	31,4	1,551	
90	**10**	40	4,44	4,44	43,4	33,5	1,654	1,644
					43,0	33,1	1,635	
80	**20**	40	10,00	5,56	46,4	36,5	1,802	1,812
					46,8	36,9	1,822	
70	**30**	40	17,14	7,14	46,2	36,3	1,793	1,793
					46,2	36,3	1,793	
60	**40**	40	26,67	9,53	45,6	35,7	1,763	1,765
					45,7	35,8	1,768	
50	**50**	40	40,00	13,33	45,3	35,4	1,748	1,751
					45,4	35,5	1,753	
40	**60**	40	60,00	20,00	45,0	35,1	1,733	1,728
					44,8	34,9	1,723	

DENSIDAD APARENTE PROMEDIO (kg/cm3)
1,801
1,799
A. FINO
33 POA
37 PMA
PORCENTAJE ÓPTIMO DE LA MEZCLA %
DENSIDAD ÓPTIMA DE LOS AGREGADOS

PORCENTAJE MÁXIMO DE AGREGADO FINO	37	%
PORCENTAJE MÁXIMO DE AGREGADO GRUESO	63	%
PORCENTAJE ÓPTIMO DE AGREGADO FINO	33	%
PORCENTAJE ÓPTIMO DE AGREGADO GRUESO	67	%
PESO UNITARIO MÁXIMO	1,801	gr./cm3
PESO UNITARIO ÓPTIMO	1,799	gr./cm3

***Fuente**: ORTEGA A. "La calidad de los agregados de tres canteras de la ciudad de Ambato y su influencia en la resistencia del hormigón empleado en la construcción de obras civiles". Tesis de Grado de la FICM - UTA, pp. 60, Ambato, (2013).*

CANTERA PLAYA LLAGCHOA

Tabla # 28 Densidad Real y Capacidad de Absorción del Agregado Grueso (Cantera Playa Llagchoa)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO				
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA				
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL				
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA				
DENSIDAD REAL Y CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO				
ORIGEN:	Cantera Playa Llagchoa			
ENSAYADO POR:	Egdo. Alberto Ortega	**FECHA:**	19/01/2013	
NORMA:	INEN 857			
DATO	**CORRESPONDENCIA**	**UNIDAD**	**VALOR 1**	
CÁLCULO DE LA DENSIDAD REAL DEL RIPIO				
M1	MASA DE LA CANASTILLA EN EL AIRE	**gr.**	1795	
M2	MASA DE LA CANASTILLA EN EL AGUA	**gr.**	1501	
M3	MASA DE LA CANASTILLA + MUESTRA S.S.S. EN EL AIRE	**gr.**	11139	
M4	MASA DE LA CANASTILLA + MUESTRA S.S.S. EN EL AGUA	**gr.**	7186	
DA	DENSIDAD REAL DEL AGUA	**gr./cm3**	1,000	
M5 = M3 - M1	MASA DE LA MUESTRA S.S.S. EN EL AIRE	**gr.**	9344	
M6 = M4 - M2	MASA DE LA MUESTRA S.S.S. EN EL AGUA	**gr.**	5685	
VR = (M5-M6) / DA	VOLUMEN REAL DE LA MUESTRA	**cm3**	3659	
DR = M5 / VR	DENSIDAD REAL DEL RIPIO	**gr./cm3**	2,554	
CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE ABSORCIÒN DEL RIPIO				
M7	MASA DEL RECIPIENTE	**gr.**	145,5	143,2
M8	MASA DEL RECIPIENTE + MUESTRA S.S.S.	**gr.**	628,1	617,3
M9 = M8 - M7	MASA DE LA MUESTRA S.S.S.	**gr.**	482,6	474,1
M10	MASA DEL RECIPIENTE + MUESTRA SECA	**gr.**	615,9	601,3
M11 = M10 - M7	MASA DE LA MUESTRA SECA	**gr.**	470,4	458,1
CA = ((M9 - M11)/M11)*100	CAPACIDAD DE ABSORCIÓN	**%**	2,59	3,49
P2 = (CA1 + CA2) / 2	CAPACIDAD DE ABSORCIÓN PROMEDIO DEL RIPIO	**%**	3,04	

***Fuente**: ORTEGA A. "La calidad de los agregados de tres canteras de la ciudad de Ambato y su influencia en la resistencia del hormigón empleado en la construcción de obras civiles". Tesis de Grado de la FICM - UTA, pp. 61, Ambato, (2013).*

CANTERA PLAYA LLAGCHOA

Tabla # 29 Densidad Real y Capacidad de Absorción del Agregado Fino (Cantera Playa Llagchoa)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO				
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA				
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL				
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA				
DENSIDAD REAL Y CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO				
ORIGEN:	Cantera Playa Llagchoa			
ENSAYADO POR:	Egdo. Alberto Ortega	**FECHA:**	19/01/2013	
NORMA:	INEN 856			
DATO	**CORRESPONDENCIA**	**UNIDAD**	**VALOR 1**	
CÁLCULO DE LA DENSIDAD REAL DE LA ARENA				
M1	MASA DEL PICNÓMETRO	**gr.**	163,3	
M2	MASA DEL PICNÓMETRO + MUESTRA S.S.S.	**gr.**	457,2	
M3	MASA DEL PICNÓMETRO + MUESTRA S.S.S. + AGUA	**gr.**	837,6	
M4 = M3 - M2	MASA AGUA AÑADIDA	**gr.**	380,4	
M5	MASA PICNÓMETRO + 500 cm3 DE AGUA	**gr.**	659,9	
M6 = M5 - M1	MASA DE 500 cm3 DE AGUA	**gr.**	496,6	
DA = M6 / 500 cm3	DENSIDAD DEL AGUA	**gr./cm3**	0,993	
M7 = M6 - M4	MASA DE AGUA DESALOJADA POR LA MUESTRA	**gr.**	116,2	
Msss = M2 - M1	MASA DEL AGREGADO	**gr.**	293,9	
Vsss = M7 / DA	VOLUMEN DE AGUA DESALOJADA	**cm3**	117,0	
DRA = Msss / Vsss	DENSIDAD REAL DE LA ARENA	**gr./cm3**	2,512	
CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE LA ARENA				
M7	MASA DEL RECIPIENTE	**gr.**	33,1	32,8
M8	MASA DEL RECIPIENTE + MUESTRA S.S.S.	**gr.**	88,4	80,1
M9 = M8 - M7	MASA DE LA MUESTRA S.S.S.	**gr.**	55,3	47,3
M10	MASA DEL RECIPIENTE + MUESTRA SECA	**gr.**	88,2	79,7
M11 = M10 - M7	MASA DE LA MUESTRA SECA	**gr.**	55,1	46,9
CA = ((M9 - M11)/M11)*100	CAPACIDAD DE ABSORCIÓN	**%**	0,36	0,85
P2 = (CA1 + CA2) / 2	CAPACIDAD DE ABSORCIÓN PROMEDIO DEL ARENA	**%**	0,61	

***Fuente**: ORTEGA A. "La calidad de los agregados de tres canteras de la ciudad de Ambato y su influencia en la resistencia del hormigón empleado en la construcción de obras civiles". Tesis de Grado de la FICM - UTA, pp. 62, Ambato, (2013).*

CANTERA PLAYA LLAGCHOA

Tabla # 30 Resistencia al Desgaste - Prueba de los Ángeles Agregado Grueso (Cantera Playa Llagchoa)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO				
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA				
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL				
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA				
RESISTENCIA AL DESGASTE - PRUEBA DE LOS ÁNGELES AGREGADO GRUESO				
ORIGEN:	Cantera Playa Llagchoa			
ENSAYADO POR:	Egdo. Alberto Ortega	**FECHA:**	18/01/2013	
NORMA:	INEN 860			
ENUNCIADO		**UNIDAD**	**M1**	**M2**
PESO DE LA MUESTRA ANTES DEL ENSAYO		gr.	5000,0	5000,0
PESO MUESTRA DESPUÉS DEL ENSAYO RET. # 12		gr.	2985,7	2978,7
PESO MUESTRA PASA # 12		gr.	2014,3	2021,3
% DESGASTE		%	40,286	40,43
PROMEDIO		%	40,4	

***Fuente**: ORTEGA A. "La calidad de los agregados de tres canteras de la ciudad de Ambato y su influencia en la resistencia del hormigón empleado en la construcción de obras civiles". Tesis de Grado de la FICM - UTA, pp. 63, Ambato, (2013).*

4.1.2 Ensayos Realizados en el Cemento

Tabla # 31 Densidad Real del Cemento

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO				
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA				
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL				
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA				
DENSIDAD REAL DEL CEMENTO				
ORIGEN:	Cemento TIPO IP			
ENSAYADO POR:	Egda. Ma. Fernanda Millán	**FECHA:**	08/05/2013	
DATOS	**CORRESPONDENCIA**	**UNIDAD**	**M1**	**M2**
M1	MASA DEL PICNÓMETRO	**gr.**	163,2	161,7
M2	MASA DEL PICNÓMETRO + CEMENTO	**gr.**	338,1	340,5
M3	MASA DEL PICNÓMETRO + CEMENTO + GASOLINA	**gr.**	663,1	661,5
M4 = M3 - M2	MASA GASOLINA AÑADIDA	**gr.**	325	323,4
M5	MASA DEL PICNÓMETRO + 500 cm3 GASOLINA	**gr.**	530,5	528
M6 = M5 - M1	MASA 500 cm3 GASOLINA	**gr.**	367,3	366,3
DG = M6 / 500	DENSIDAD DE LA GASOLINA	**gr./cm3**	0,735	0,733
M7 = M6 - M4	MASA GASOLINA DESALOJADA POR EL CEMENTO	**gr.**	42,3	42,9
MC = M2 - M1	MASA DE CEMENTO	**gr.**	174,9	178,8
VG = M7 / DG	VOLUMEN DE GASOLINA DESALOJADA	**cm3**	57,58	58,56
DRC = MC/VG	DENSIDAD REAL DEL CEMENTO	**gr./cm3**	3,037	3,053
P = (DRC1 + DRC2) / 2	DENSIDAD REAL PROMEDIO DEL CEMENTO	**gr./cm3**	3,045	

4.1.3 Selección de la Fibra de Polipropileno

De acuerdo a la norma ASTM C-1116, la selección de la fibra de polipropileno para refuerzo en el hormigón se debe basar en el tamaño nominal máximo del agregado grueso de tal manera que la longitud de la fibra pueda envolver a los agregados permitiendo coser la matriz del hormigón como se muestra a continuación:

Tabla # 32 Longitud de Fibra

TAMAÑO NOMINAL MAXIMO		LONGITUD DE FIBRA	
(pulg)	(mm)	(pulg)	(mm)
¼	6	3/4	19
½	13	1-1/2	38
¾	19	2-1/4	54
1	+ 25	2-1/2	60

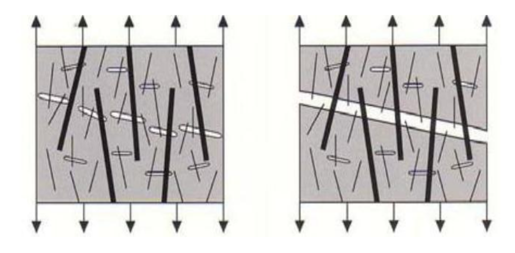
Fuente: *ASTM C-1116, Standard Specification for Fiber Reforced Concrete and Shorcrete.*

En cuanto a su forma la fibra de polipropileno puede clasificarse en:[37]

Fibras polipropileno tipo multifilamento, está conformada por un conjunto de monofilamentos de polipropileno son las más recomendables para su uso en hormigón debido a que se distribuyen uniformemente en la matriz del concreto.

Fibras polipropileno tipo fibriladas, son fibras en forma de cintas su distribución es irregular en el hormigón debido a la concentración local de fibras, por lo que requiere mayor cuidado en su aplicación.

Gráfico # 13 Cosido de la matriz de Hormigón



Fuente: (I. Markovic, 2007)

[37] *ACI Committee 544. State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concret.e 544.1R-42*

4.2 INTERPRETACIÓN DE DATOS

4.2.1 Interpretación de Datos de Ensayos Realizados en Agregados

Mediante los ensayos de laboratorio de los agregados (grueso y fino) realizados por el Egdo. Alberto Ortega en la Facultad de Ingeniería Civil Mecánica en su tesis: ***"La calidad de los agregados de tres canteras de la ciudad de Ambato y su influencia en la resistencia del hormigón empleado en la construcción de obras civiles"***, se comprobó que los agregados de las diferentes canteras, están dentro de los límites admisibles y cumplen con las Normas Técnicas especificadas para cada ensayo, siendo aptos para su utilización en la elaboración de hormigón.

Tabla # 33 Interpretación de Resultados de las Diferentes Canteras

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO				
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA				
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL				
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA				
AGREGADO GRUESO (RIPIO)				
PROPIEDAD MECÁNICA	**UNIDAD**	**CANTERA VILLACRÉS**	**PLANTA DE TRITURACIÓN DE ÁRIDOS CONSTRUCTORA ARIAS**	**CANTERA PLAYA LLAGCHOA**
Tamaño Nominal Máximo	plg.	1 1/2"	1 "	1 1/2"
Peso Unitario Suelto	gr./cm3	1.382	1.306	1.395
Peso Unitario Compactado	gr./cm3	1.558	1.583	1.551
Peso Específico	gr./cm3	2.585	2.611	2.554
Capacidad de Absorción	%	3.64	4.26	3.04
Resistencia al Desgaste - Abrasión	%	42.5	39.4	40.4
AGREGADO FINO (ARENA)				
Módulo de Finura	-	3.0	2.9	2.5
Peso Unitario Suelto	gr./cm3	1.326	1.316	1.306
Peso Unitario Compactado	gr./cm3	1.565	1.560	1.531
Peso Específico	gr./cm3	2.568	2.624	2.512
Capacidad de Absorción	%	1.23	1.22	0.61
MEZCLA DE LOS AGREGADOS				
Peso Unitario Máximo	gr./cm3	1.893	1.891	1.801
Peso Unitario Óptimo	gr./cm3	1.890	1.888	1.799
Porcentaje Óptimo de Ripio	%	61	64	67
Porcentaje Óptimo de Arena	%	39	36	33

***Fuente**: ORTEGA A. "La calidad de los agregados de tres canteras de la ciudad de Ambato y su influencia en la resistencia del hormigón empleado en la construcción de obras civiles". Tesis de Grado de la FICM - UTA, pp. 48,56, 64 Ambato, (2013)*

4.2.2 Interpretación de Datos de Ensayos Realizados en el Cemento

Concluido el ensayo para determinar la densidad real del cemento Tipo IP según la Norma NTE INEN 156 método del picnómetro, se determinó que se encuentra dentro de los parámetros requeridos para el diseño y mezclas de hormigón.

4.2.3 Interpretación de Datos de Selección de fibras de polipropileno

La selección de la fibra de polipropileno para refuerzo en el hormigón en esta investigación dependerá del tamaño nominal del agregado grueso de acuerdo a las especificaciones dadas por la norma ASTM C-1116.

4.3 VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS

Por medio de los ensayos realizados a los agregados de las diferentes canteras del cantón Ambato provincia de Tungurahua, y la selección de fibra de polipropileno apto para la elaboración del hormigón es evidente que las propiedades físicas de los agregados y de la fibra, difieren dependiendo de la cantera en donde hayan sido extraídos o del tipo de fibra a utilizarse, y por ende influyen directamente en la propiedades mecánicas del hormigón, lo cual será verificado a través de los ensayos de laboratorio que se realizarán en el desarrollo de la propuesta en el capítulo VI.

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- De los ensayos realizados por el Egdo. Alberto Ortega en la *FICM* - *UTA* en su tesis: ***"La calidad de los agregados de tres canteras de la ciudad de Ambato y su influencia en la resistencia del hormigón empleado en la construcción de obras civiles"***. El Tamaño Nominal Máximo del agregado grueso de la Cantera Villacrés y la Cantera Playa Llagchoa fue de 1 ½" encontrándose dentro de los límites establecidos dados por la norma NTE INEN 156. En cuanto a la Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias este valor fue de 1", siendo el menor TNM de las tres canteras analizadas ya que de esta propiedad exclusiva del agregado grueso depende la longitud de la fibra de polipropileno, motivo por el cual se tomaron como referencia dichos agregados para la elaboración del hormigón.

- En esta investigación se utilizarán fibras de polipropileno de tipo multifilamento, debido a que está conformada por filamentos que se distribuyen uniformemente en la matriz del hormigón según el Comité del ACI *544.-42* en su reporte sobre la utilización de fibras en el hormigón con una longitud de 2 1/2" (60mm) y de diámetro 0,02" (0,5mm), de acuerdo a la selección de fibra según tamaño nominal del agregado grueso dado por la norma ASTM C-1116.

- Se realizarán las dosificaciones respectivas para un hormigón de f'c=210 kg/cm2 y f'c=240 kg/cm2, debido a que son las resistencias más utilizadas en proyectos estructurales, para un asentamiento considerado en el rango de (6-9) cm, que serán determinados por el método desarrollado de la Universidad Central del Ecuador.

5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar los ensayos destinados a la obtención de las propiedades mecánicas de los agregados, cada 3 a 5 años debido a que, conforme continúa la explotación en la cantera; no todo el material va a tener siempre las mismas características, si similares pero no iguales.

- Para diseñar un hormigón en el que se vaya a incluir fibra de polipropileno, se recomienda realizar los estudios respectivos y análisis de las propiedades mecánicas de los agregados que van a ser utilizados en la mezcla, ya que de éstos depende las características de fibra a emplear.

- Se deben conocer las propiedades físicas de la fibra de polipropileno que se desee utilizar como refuerzo en hormigones para garantizar un óptimo resultado, por cuanto difieren unas fibras de otras según las especificaciones dadas por cada fabricante.

CAPÍTULO VI
PROPUESTA

“DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN EL HORMIGÓN SEGÚN SU COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN, TRACCIÓN Y FLEXIÓN CON AGREGADOS DE LA PLANTA DE TRITURACIÓN DE ÁRIDOS CONSTRUCTORA ARIAS DEL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA”

6.1 DATOS INFORMATIVOS

En este capítulo se realizarán dosificaciones de hormigón con distintas concentraciones de fibra utilizando agregados de la Planta de Trituración de Áridos de la Constructora Arias y fibra de polipropileno de tipo multifilamento los mismos que se describen a continuación:

6.1.1 Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias

En base al tamaño nominal del agregado grueso que resulta importante para el desarrollo de esta investigación se tomó como referencia a La Planta de Trituración de Áridos de la Constructora Arias.

La Planta Industrial para la trituración de áridos se encuentra localizada en el cantón Ambato, parroquia Pishilata estratégicamente ubicada en el sector de Las Viñas, es una industria especializada en el trabajo con material pétreo destinado a la construcción de diferentes tipos de obras civiles para lo cual utilizan agregados grueso y fino de diferentes canteras como materia prima para la trituración, siendo su principal fuente de abastecimiento la cantera Kumochi, la misma que provee

aproximadamente con el 90% de agregados que procesa esta industria. Los agregados para su trituración son clasificados mediante zarandeo mecánico además de pasar por procesos de mejoramiento tales como el lavado.

Esta Planta de Trituración de Áridos es propiedad de la Constructora Arias en donde se procesan diariamente un volumen estimado de 300 m3 y mensualmente un volumen total entre 10.000 y 11.000 m3 de material pétreo.

Esta industria lleva en el mercado de la construcción 8 años, como principales proveedores de material pétreo en el centro del país, además cuentan con equipo técnico y personal calificado para el procesamiento y trituración de áridos.

Gráfico # 14 Ubicación Planta de Trituración de Áridos

Fuente: *Google maps (2013)*

6.1.2 Fibras de Polipropileno de Tipo Multifilamento

"Están constituidas por la unión de monofilamentos formados por procesos de extrusión por medio de estiramiento en caliente del polipropileno a través de un troquel de sección circular, son las más recomendables para su uso en hormigón debido a que se distribuyen uniformemente en la matriz del concreto."[38]

Tabla # 34 Propiedades de la Fibra de polipropileno

PROPIEDADES DE LAS FIBRAS POLIPROPILENO	
Material :	Polipropileno 100% Virgen
Tipo:	Fibra multifilamento
Gravedad Específica:	0,9 g/cm3
Absorción	Ninguna
Resistencia a la tracción:	570 a 660 kg/cm2
Resistencia a ácidos:	Alta
Resistencia a alcalis:	100 % resistente a alcalis
Punto de Fusión:	160 ºC a 170 ºC
Conductividad Térmica:	Baja
Elongación Última :	Aprox. 15 %
Norma	ASTM C-1116

Fuente: *PUJADAS, P. Durabilidad del hormigón con fibras de polipropileno.*

Ventajas y Beneficios de la Fibra de Polipropileno

- No son magnéticas.
- Es químicamente inerte
- No requiere cantidad mínima de recubrimiento de hormigón
- Es bombeable.
- No le afectan los procesos de corrosión y oxidación a diferencia de los hormigones reforzados con fibra metálica.
- Trabajan sin afectar la hidratación química del concreto y son compatibles con todos los diseños de concreto y aditivos. Su acción es puramente mecánica y para aplicaciones diarias trabaja sin cambiar las proporciones de mezcla
- Se distribuyen uniformemente dentro del concreto después del mezclado en el tiempo y velocidad normales. El mezclado excesivo no alterará el desempeño de las fibras.

[38] *ACI Committee 544.* ***State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concret.e 544.1R-42***

- Las fibras de polipropileno no cambian la densidad del mortero pero reducen la formación de microgrietas, permitiendo que el concreto progrese del estado plástico al endurecido con mayor integridad.
- Reduce la segregación y evita el asentamiento del agregado grueso, contribuye a mejorar la resistencia al agua del concreto en estado endurecido, ayudando a proteger el acero de refuerzo primario contra los efectos de la corrosión.
- Proporciona al concreto mayor durabilidad a hielo/deshielo desde la edad temprana de la estructura y a lo largo de su vida útil.
- Tiene un excelente funcionamiento bajo aplicación a presión reduciendo el rebote y la pérdida de material en aplicaciones de concreto lanzado.
- Ayuda a reducir el efecto "spalling" en el concreto.
- Es importante tener en cuenta que la fibra de polipropileno no debe ser utilizada para sustituir el refuerzo estructural.[39]

6.2 ANTECEDENTES DE LA PROPUESTA

Muñoz F., "Comportamiento Mecánico del Hormigón Reforzado con Fibra de Polipropileno Multifilamento: Influencia del Porcentaje de Fibra Adicionado" Taller de proyecto final de grado en materiales avanzados de la Universidad Politécnica de Valencia, (2012), concluye que "Al incrementar cantidad de fibra en el hormigón se pierde la trabajabilidad y a la vez este efecto puede ser beneficioso, ya que se aumenta la cohesión del hormigón, lo que ofrece algunas ventajas constructivas en algunas obras particulares, tales como hormigonado de taludes, vaciado del hormigón desde cierta altura y hormigón proyectado"

Conrado M., "Diseño de hormigones con fibras de polipropileno para resistencias a la compresión de 21 y 28 Mpa con agregados de la cantera de Guayllabamba." tesis de grado de la Universidad Central del Ecuador, Quito (2012), menciona que "Con el objetivo de comparar el comportamiento mecánico del hormigón simple con el hormigón reforzado con fibras se llevó a la rotura varias muestras evidenciándose que la rotura de las probetas con fibras no se segrega fácilmente

[39] *Ventajas y Beneficos de la Fibra de Polipropileno. www.basf.com.ec*

con relación a las probetas de hormigón simple, debido a que la fibra de polipropileno actúa como una red que une a la mezcla manteniéndolo como un solo elemento por un mayor tiempo, haciendo así más difícil su destrucción lo cual se convierte en un factor de seguridad en el caso de un desastre natural."

Monsó A., "Análisis del comportamiento del hormigón reforzado con fibras para el ensayo Barcelona y de flexotracción" tesis de grado de la Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, (2011). Indica que "El hormigón reforzado con fibras lleva muchos años usándose en diferentes países. Pero es ahora cuando más se está potenciando su uso para finalidades estructurales.

Tradicionalmente ha sido una adición al hormigón para ser usado en pavimentos. Este tipo de elementos están muy expuestos a sufrir fisuras debido a su geometría y disposición de cargas a lo largo de su vida útil. El hormigón desarrolla buenos resultados a compresión, pero su capacidad de resistir cargas disminuye muy pronunciadamente cuando se fisura. Esta pérdida de resistencia es más aguda en tracción y flexión. De este modo, el hecho de añadir fibras al hormigón aporta la cualidad de resistir cargas una vez que éste ya ha fisurado.

Cabe destacar que para evaluar la aplicabilidad del hormigón reforzado con fibras se deben tener en cuenta los distintos factores que influyen en su rendimiento. El primer factor a tener en cuenta es la cantidad de fibras que se incluirá. Este parámetro se mide en kg/m3 y nos define la masa de fibras que hay por unidad de volumen del hormigón."

Beltrán L., "Hormigón reforzado con fibras de polipropileno", Tesis de Grado de la Escuela Politécnica Nacional, Quito, (1986). Indica que "La efectividad de las fibras está relacionada con la capacidad de dispersión, frecuencia de fibra y finura de éstas. Sin mencionar que en función de la concentración, la longitud y las características de la fibra se confiere al hormigón propiedades distintas, de esta manera se acentúan más unas propiedades sobre otras en función de los distintos usos y aplicaciones del hormigón reforzado con fibras."

6.3 JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de la tecnología y los nuevos métodos de construcción han permitido la adición de fibras como refuerzo en el hormigón, sin embargo las fibras para alcanzar determinadas propiedades y exigencias necesitan de bases técnicas y científicas muy sólidas como son las normas dadas por el ACI, y la ASTM.

De ahí la importancia de esta investigación que radica en conocer el comportamiento mecánico del hormigón reforzado con fibras de polipropileno, al analizar como influye en sus propiedades mecánicas y a la vez determinar una cierta cantidad de fibra que aporte nuevas características al concreto como son: evitar la formación de fisuras en edades tempranas, impedir y controlar la formación de grietas, incrementar la resistencia a la tracción, flexión y compresión.

Después de conocer las ventajas del hormigón reforzado con fibras de polipropileno es importante mencionar que la mayoría de los ingenieros y constructores utilizan este tipo de fibras sin tener en cuenta la calidad y las características de los agregados, en este caso el tamaño nominal del agregado grueso ya que de esta propiedad depende la selección y determinación de la longitud de la fibra a ser utilizada como refuerzo en el hormigón según las recomendaciones dadas por la norma ASTM C-1116.

De todo lo expuesto, se considera relevante aportar esta investigación como una guía para la utilización de fibras de polipropileno como refuerzo en hormigones con un agregado propio de nuestra zona y provincia, teniendo en cuenta la poca o nula información que en la actualidad existe en nuestro país acerca de este material compuesto.

Para esto la prioridad se centrará en determinar la cantidad adecuada de fibra de polipropileno que debe añadirse al hormigón para distintas dosificaciones de manera que éste presente mejoras positivas en sus propiedades mecánicas.

6.4 OBJETIVOS

6.4.1 Objetivo General

Determinar el porcentaje óptimo de fibras de polipropileno en el hormigón según su comportamiento a compresión, tracción y flexión con agregados de la Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias del Cantón Ambato, Provincia de Tungurahua.

6.4.2 Objetivos Específicos

- Estudiar el comportamiento mecánico del hormigón reforzado con fibras de polipropileno con agregados de la Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias del Cantón Ambato, Provincia de Tungurahua.

- Preparar hormigones de distintas dosificaciones con diferentes concentraciones de fibra de polipropileno para determinar el porcentaje óptimo de fibra que se debe adicionar en el hormigón, finalmente realizar una comparación entre el hormigón simple y el hormigón con el porcentaje óptimo de fibra determinado para analizar cómo influye la adición de fibras en sus propiedades mecánicas.

- Analizar los resultados obtenidos en la presente investigación para emitir conclusiones con criterio sobre la incorporación de fibras de polipropileno en el hormigón.

- Proporcionar toda la información técnica generada sobre la adición de fibras de polipropileno en el hormigón como una guía para los constructores, fiscalizadores y demás personas involucradas en el campo de la construcción o interesadas en el tema.

6.5 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD

Los ensayos de laboratorio para determinar la calidad, características y propiedades de los agregados desempeñan un papel fundamental en el desarrollo de esta investigación ya que influyen directamente en la selección de fibra de polipropileno que se utilizará como refuerzo en el hormigón de acuerdo a las recomendaciones dadas por la norma ASTM C-1116, y a la vez permitirán realizar dosificaciones para distintas resistencias y concentraciones de fibra analizando las propiedades mecánicas del hormigón en estado fresco y endurecido.

"Las propiedades mecánicas del HRFP (***Hormigón Reforzado con Fibra de Polipropileno)*** dependen de varios factores que modifican sus características como: el contenido de fibra, el tamaño nominal máximo del agregado grueso, la relación agua/cemento, la porosidad, la orientación y la longitud de fibra además de la importancia que representa el curado."[40]

6.6 FUNDAMENTACIÓN

6.6.1 Dosificación de Hormigón según el método de la Universidad Central del Ecuador

Para la dosificación de hormigones, en esta investigación se utilizará el método desarrollado por la Universidad Central del Ecuador debido a que considera las propiedades y características de los agregados a ser utilizados.

Los datos requeridos para la dosificación son:

- Resistencia a compresión (f'c)
- Asentamiento Requerido
- Densidad Real del Cemento (DRC)

[40] American Concrete Institute, An International symposium: fibre reinforced concrete, Detroit: ACI, 1974 (ACI Special Publication SP-44)

- Densidad Real de la Arena (DRA)
- Densidad Real del Ripio (DRR)
- Porcentaje Óptimo de Arena (POA)
- Porcentaje Óptimo de Ripio (POR)
- Densidad Óptima de la Mezcla de Agregados (DOMAg)
- Porcentaje de Aire en el Hormigón

DESARROLLO:

1. **Densidad Real del Agregado (DRAg)**

$$DRAg = DRA * POA + DRR * POR$$

2. **Porcentaje Óptimo de Vacíos**

$$POV = \frac{DRAg - DOMAg}{DRAg} * 100$$

3. **Cantidad de Pasta (CP)**

$$CP = k * POV$$

Donde ***(k)*** es una constante en función del asentamiento requerido del Hormigón de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla # 35 Valor de constante (k) según el asentamiento requerido para dosificación método de la Universidad Central del Ecuador

Asentamiento (cm)	k
0 - 3	1,04
3 - 6	1,08
6 - 9	1,11
9 - 12	1,13
12 - 15	1,14

Fuente: *GARZÓN, M., "Seminario de Graduación, Investigación sobre el Módulo de Elasticidad del Hormigón", Universidad Central del Ecuador, p. 46-A, Quito, (2006)*

4. **Relación Agua / Cemento**

Está dada en función de la resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días de edad (f'c).

Tabla # 36 Relación Agua / Cemento para dosificación método de la Universidad Central del Ecuador

Resistencia a la Compresión del Hormigón (f'c) en kg/cm2	w / c
140	0,77
180	0,70
210	0,62
240	0,59
280	0,56
350	0,45

Fuente: *GARZÓN, M., "Seminario de Graduación, Investigación sobre el Módulo de Elasticidad del Hormigón", Universidad Central del Ecuador, p. 46-A, Quito, (2006)*

5. **Cantidad de Cemento (C)**

$$C = \frac{CP}{w/c \ + \frac{1}{DRC}}$$

6. **Cantidad de Agua (W)**

$$W = w/c * C$$

7. **Cantidad de Arena (A)**

$$A = (1000 - CP - \%\ AIRE) * DRA * POA$$

8. **Cantidad de Ripio (R)**

$$R = (1000 - CP - \%\ AIRE) * DRR * POR$$

9. Resultado

Finalizado el proceso descrito anteriormente se obtienen las cantidades de material necesarias para la dosificación de un metro cúbico de hormigón, considerando que los agregados deben estar en condición de saturado superficialmente seco (sss).

Se puede resumir en el siguiente cuadro:

Tabla # 37 Dosificación al Peso mediante el método de la Universidad Central del Ecuador

Material	W	C	A	R
Cantidad en Kg por cada m3 de Hormigón				
Dosificación al Peso	W/C	C/C	A/C	R/C

Fuente: *GARZÓN, M., "Seminario de Graduación, Investigación sobre el Módulo de Elasticidad del Hormigón", Universidad Central del Ecuador, p. 46-A*, Quito, (2006)

10. Dosificación de Hormigón para Cilindros (DHC)

$$DHC = Dosificación\ al\ Peso * VC$$

Datos:

- Número de cilindros (# Cilindros)
- Diámetro del Cilindro (D)
- Altura del Cilindro (H)
- Volumen de Cilindros (VC)

$$VC = \left(\frac{\pi * D^2}{4} * H\right) * \#\ Cilindros$$

6.6.2 Porcentaje de Fibra de Polipropileno en el Hormigón

De acuerdo a las recomendaciones dadas por el ACI-544.2R[41], a través de su reporte de Hormigón Reforzado con Fibras, menciona que el porcentaje de fibra de polipropileno varía del 0,1% al 10% del volumen de hormigón, considerando este último porcentaje como una concentración relativamente alta con una contribución no uniforme a la matriz del hormigón, a más de deteriorar significativamente sus propiedades mecánicas.

El mismo ACI-544.2R, más adelante, menciona que se obtienen resultados satisfactorios en cuanto a sus propiedades mecánicas, con contenidos de fibra que oscilan entre el 0,1% al 0,3% en volumen de hormigón, encontrándose entre este rango el porcentaje óptimo de fibra de polipropileno, el cual debe ser verificado debido a que varía según el tipo de fibra, los requerimientos del hormigón, y las características de los agregados.

6.6.2.1 Dosificación de Fibra de Polipropileno para Cilindros

DATOS:

- Diámetro del cilindro (D)
- Altura del cilindro (H)
- Número de cilindros por cada concentración de fibra (# Cilindros)
- Porcentaje de Fibra de Polipropileno en el Hormigón (%Fp)
- Densidad de la Fibra de Polipropileno (DFp)
- Densidad del Hormigón (DH)

DESARROLLO:

1. **Volumen del Cilindro (VC)**

[41] *ACI, "Report on Fiber Reinforced Concrete", p. 544.1R-47, literal 4.3.7 "Polypropylene FRC", (2002).*

$$VC = \frac{\pi * D^2}{4} * H$$

2. Masa del Cilindro de Hormigón (MCH)

$$MCH = VC * \mathrm{DH}$$

3. Masa de Hormigón necesario para muestras cilíndricas (MHC)

$$MHC = MCH * \#\ Cilindros$$

4. Volumen de Hormigón necesario para muestras cilíndricas (VHC)

$$VHC = \frac{MHC}{DH}$$

5. Volumen de la Fibra de Polipropileno en el Hormigón (VFp)

Según la norma ACI-544.2R[42], la concentración de fibra de polipropileno debe adicionarse en función del volumen de hormigón.

1 m3 —— 100 %

x —— %Fp

x = VFp

6. Masa ó concentración de la Fibra de polipropileno en el Hormigón (MFp)

$$MFp = VFp * DFp$$

7. Cantidad de Fibra de Polipropileno para muestras cilíndricas (CFpC)

$$CFpC = MFp * VHC$$

[42] *ACI, "Report on Fiber Reinforced Concrete", p. 544.1R-47, literal 4.3.7 "Polypropylene FRC"*

6.6.2.2 Dosificación de Fibra de Polipropileno para Vigas

DATOS:

- Longitud de la Viga (Lv)
- Ancho de la Viga (Av)
- Alto de la Viga (Hv)
- Número de vigas por cada concentración de fibra (# Vigas)
- Porcentaje de Fibra de Polipropileno en el Hormigón (%Fp)
- Densidad de la Fibra de Polipropileno (DFp)
- Densidad del Hormigón (DH)

DESARROLLO:

1. **Volumen de la Viga (VV)**

$$VV = (Lv * Av) * Hv$$

2. **Masa de la Viga de Hormigón (MVH)**

$$MVH = VV * DH$$

3. **Masa de Hormigón necesario para muestras de vigas (MHV)**

$$MHV = MVH * \# Vigas$$

4. **Volumen de Hormigón necesario para muestras de vigas (VHV)**

$$VHV = \frac{MHV}{DH}$$

5. **Volumen de la Fibra de Polipropileno en el hormigón (VFp)**

Según la norma ACI-544.2R[43], la concentración de fibra de polipropileno debe adicionarse en función del volumen de hormigón.

1 m3 —— 100 %
x —— %Fp

x = VFp

6. **Masa ó concentración de la Fibra de polipropileno en el hormigón (MFp)**

$$MFp = VFp * DFp$$

7. **Cantidad de Fibra de Polipropileno para muestras de vigas (CFpV)**

$$CFpV = MFp * VHV$$

6.6.3 Propiedades Mecánicas del Hormigón

El Hormigón presenta propiedades interesantes tanto en estado fresco como en estado endurecido, es por ello que enunciaremos dichas propiedades de acuerdo al estado en que presenta.

6.6.3.1 Propiedades del Hormigón en Estado Fresco

a) Trabajabilidad

La norma ASTM C-995 define que “la trabajabilidad del Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) se debe medir con el método del cono invertido que mide la movilidad o la fluidez del hormigón, debido a que está directamente relacionado

[43] *ACI, “Report on Fiber Reinforced Concrete”, p. 544.1R-47, literal 4.3.7 “Polypropylene FRC”*

con su deformabilidad, es decir, su consistencia."[44] Sin embargo, para determinar la trabajabilidad en esta investigación se utilizará el ensayo de asentamiento mediante el cono de Abrams descrito en la norma NTE INEN 1578 – ASTM C143, para un asentamiento de 6-9 cm.

b) Consistencia

La consistencia depende de varios factores como son: cantidad de agua de amasado, granulometría y la forma de los agregados.

"De acuerdo a su consistencia los hormigones se clasifican en: seca, plástica, blanda, fluida y líquida. A continuación en la siguiente tabla se indican los estados de consistencia que se pueden presentar en el hormigón en función del asentamiento que se obtiene a través del cono de Abrams. Considerando que la consistencia líquida no es admisible para hormigón armado."[45]

Tabla # 38 Consistencia del hormigón en función del asentamiento

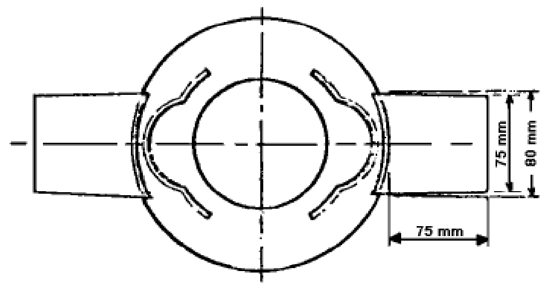
Consistencia	Asentamiento en el cono de Abrams (cm.)	Trabajabilidad
Seca	0 a 2	Muy baja
Plástica	3 a 5	Baja
Blanda	6 a 9	Media
Fluida	10 a 15	Alta
Líquida	> 16	Muy Alta

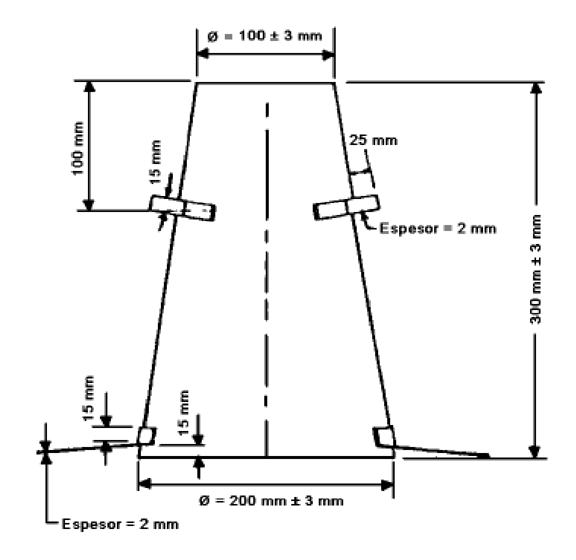
Fuente: *MONTOYA P., "Hormigón Armado", Décima edición, pp 76, Barcelona (2000)*

"El cono de Abrams, es un molde de forma troncocónica, el cual es rellenado con el hormigón objeto de ensayo. La pérdida de altura que experimenta la masa fresca del hormigón una vez desmoldada, expresada en centímetros, da una medida de su consistencia."[46]

[44] *Norma ASTM C 995. Método de prueba estándar para determinar el asentamiento del concreto reforzado con fibras a través del cono invertido.*
[45] *MONTOYA P., "Hormigón Armado", Décima edición, pp 76, Barcelona (2000)*
[46] *NTE INEN 1578 – Hormigón de cemento hidráulico - Determinación del asentamiento*

Gráfico # 15   Cono de Abrams



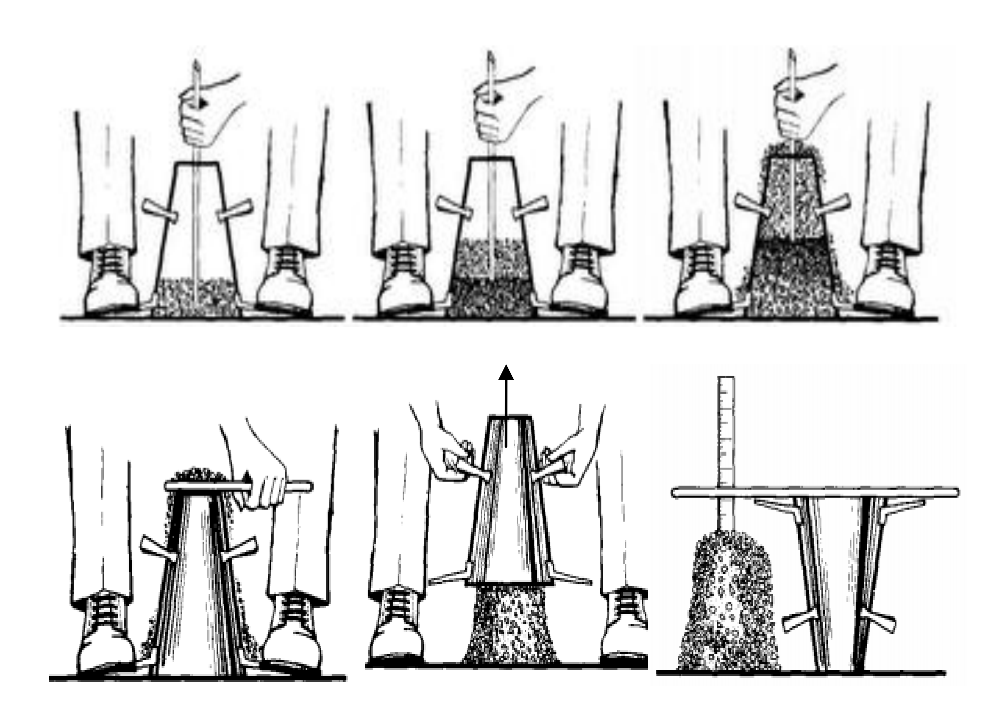


Fuente: *NTE INEN 1578 – Hormigón de cemento hidráulico - Determinación del asentamiento*

De acuerdo a la norma NTE INEN 1578 para realizar adecuadamente el ensayo de asentamiento mediante el cono de Abrams se debe seguir los siguientes pasos:

- Colocar el cono sobre una bandeja o placa rígida.
- Llenar el cono en tres capas, compactando cada una de ellas con una varilla metálica de 16 mm de punta redonda, dando 25 golpes por capa.
- Enrasar la superficie retirando el exceso de hormigón.
- Sacar el molde con cuidado en dirección vertical. Esta operación debe realizarse en 5 ± 2 segundos sin mover el hormigón en ningún momento.
- El asentamiento se mide como indica el gráfico # 16. Si la superficie del cono es irregular, el asentamiento se determina midiendo la diferencia de altura del molde y la del punto medio de la parte superior de la muestra después del ensayo.

Gráfico # 16 Ensayo Cono de Abrams



Fuente: *http://www.construmatica.com/construpedia/Consistencia_Hormigon_Fresco*

c) Homogeneidad

"El hormigón fresco se considera homogéneo cuando en cualquier parte de su masa la composición es similar. En el caso de hormigones reforzados con fibra, la homogeneidad se puede ver afectada por tres causas fundamentales:

1. **Segregación de los componentes**: el riesgo de segregación aumenta si se incrementa el tamaño máximo del árido, se adopta una granulometría discontinua o se dispone un volumen insuficiente de pasta de cemento.

2. **Formación de bolas o erizos*:*** se produce por una concentración local de fibras entrecruzadas o enmarañadas

3. **Exudación*:*** ésta se produce cuando el volumen de agua empleada en el amasado es superior que la cantidad de cemento y los áridos." [47]

[47] *Beltrán A. (2008). Ensayos en el Hormigón*

d) Densidad del Hormigón Fresco

La densidad o masa específica del hormigón depende principalmente de la naturaleza de los agregados, su granulometría y la forma de compactación que fue empleada. Mientras mayor sea la densidad de los agregados utilizados y mejor compactada esté la mezcla, será mayor la densidad del hormigón.

"La norma NTE INEN 1579 establece el método de ensayo para determinar la densidad del hormigón recién mezclado. El mismo que indica que una vez determinada la masa del hormigón compactada dentro de un recipiente, se relaciona para el volumen del mismo obteniéndose de esta forma la densidad del hormigón, utilizando la siguiente fórmula."[48]

$$D_{HF} = \frac{Mc - Mm}{Vm}$$

Donde:

D_{HF} = Densidad del hormigón fresco, (kg/m³)
Mc = Masa del recipiente de medición lleno con hormigón, (kg)
Mm = Masa del recipiente de medición, (kg)
Vm = Volumen del recipiente de medición, (m³)

6.6.3.2 Propiedades del Hormigón en Estado Endurecido

a) Resistencia a la Compresión del Hormigón

"Este método de ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a los cilindros moldeados o núcleos de hormigón de cemento hidráulico a una velocidad que se encuentra dentro de un rango definido hasta que ocurra la falla total o parcial del espécimen:"[49]

---

[48] *NTE INEN 1579:2013 Hormigón de cemento Hidráulico. Determinación de la densidad.*
[49] *Norma NTE INEN 1573. Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros*

La resistencia a la compresión de un espécimen se calcula como se indica en la siguiente fórmula:

$$f'c = \frac{Pmáx}{\frac{\pi * D^2}{4}}$$

Donde:

$f'c$ = Resistencia a la compresión del Hormigón
Pmáx = Carga máxima alcanzada durante el ensayo
D = Diámetro de la sección trasversal del espécimen

Procedimiento:

"Para desarrollar correctamente este ensayo se nivela la base superior de la probeta, que es la que no ha estado encofrada, y por tanto presenta ciertas irregularidades que evitaría la distribución homogénea de cargas, la cual se corrige mediante la utilización de cabezales con neopreno.

A continuación se coloca la probeta en la prensa lo más centrada posible para evitar una excentricidad en la aplicación de la carga la misma que pueda producir variaciones en el ensayo. Se configura la máquina para que, una vez alcanzada la carga máxima de la probeta se detenga el ensayo. Los valores que se obtienen del ensayo son básicamente los de carga máxima

Para la aceptación de la resistencia a compresión los cilindros deben ser de 150 mm x 300 mm ó de 100 mm x 200 mm, en donde la longitud del cilindro debe ser el doble del diámetro y el diámetro debe ser por lo menos 3 veces el tamaño máximo nominal del árido grueso."[50].

[50] *Norma NTE INEN 1576. Elaboración y curado de cilindros*

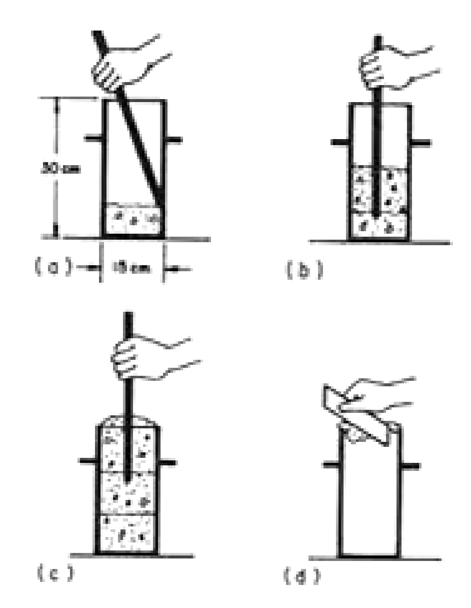
Gráfico # 17 Compresión Cilindros de Hormigón



Fuente: *http://www.construmatica.com/construpedia/Compresión_de_cilindros*

Las probetas de hormigón para este ensayo se moldean de acuerdo a las normas NTE INEN 1576 - ASTM C 31, y una vez transcurridas las primeras 24 horas se procede a desmoldar e inmediatamente se acondiciona la probeta para su mantenimiento (curado del hormigón norma NTE INEN 2528[51]) hasta el momento de ensayo.

Gráfico # 18 Toma de muestras cilíndricas de hormigón



Fuente: *http://www.construmatica.com/construpedia/Muestras_de_cilindros*

---

[51] *Norma NTE INEN 2528. Cámaras de curado, gabinetes húmedos, tanques para almacenamiento en agua y cuartos para elaborar mezclas, utilizados en ensayos de cementos hidráulico y hormigón.*

b) Resistencia a la Tracción Indirecta o Tracción por compresión

"Se moldea la probeta de acuerdo a la norma NTE INEN 1576.[52], y consiste en someter al cilindro de hormigón a compresión diametral. Una de las caras de la muestra permanece apoyada mientras que la diametralmente opuesta recibe la carga del ensayo. Esta aplicación de carga produce una distribución de tensiones transversales a lo largo del eje terminando con la rotura por tracción de la muestra.

A fin de distribuir uniformemente la carga, se interponen entre el cilindro de hormigón y las placas superior e inferior de apoyo de la máquina de ensayo, pequeños listones de cartón o de madera libres de imperfecciones, de 4 mm de espesor, 25 mm de ancho aproximadamente y la longitud igual o ligeramente mayor que la del cilindro. Los listones deben utilizarse una sola vez. Se coloca un listón de apoyo a lo largo del centro de la placa inferior, a continuación se sitúa el cilindro sobre el listón de tal manera que el punto de tangencia de las dos bases esté concentrado sobre la lámina de apoyo. Se coloca el segundo listón longitudinalmente sobre el cilindro, centrándolo en forma similar al anterior.

El ensayo se realiza con carga continua y sin impacto a velocidad constante y se termina cuando alcanza la carga máxima y se rompe el cilindro, con la que se calcula la tensión máxima de tracción mediante la siguiente expresión:"[53]

$$f't = \frac{2 * P}{\pi * D * L}$$

Donde:

$f't$ = Resistencia de tracción indirecta

P = Carga máxima indicada por la máquina de ensayo

D = Diámetro del cilindro

L = Longitud del cilindro

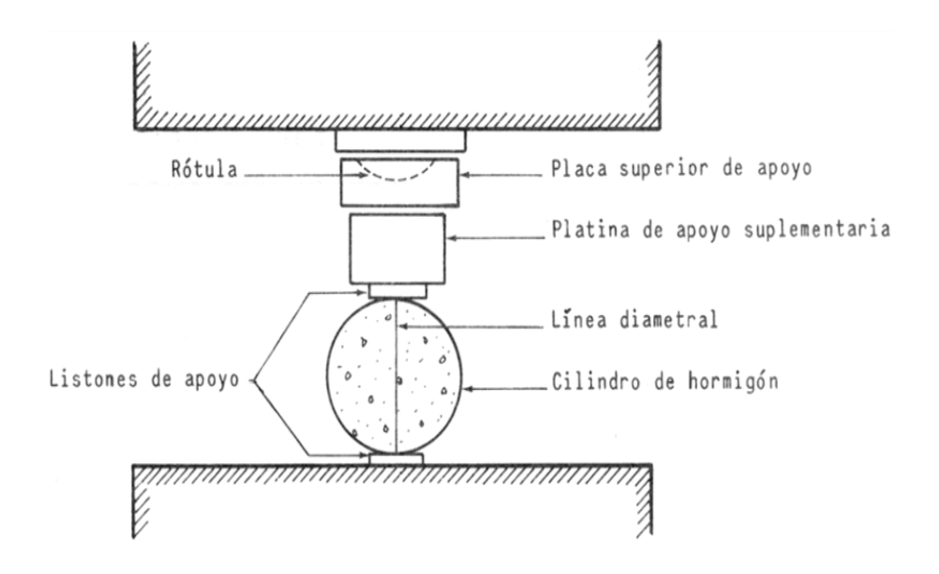
---

[52] *Norma NTE INEN 1576. Elaboración y curado en obra de cilindros*

[53] *Norma ASTM C 496-96. Determinación de la resistencia a la tracción Indirecta de especímenes cilíndricos de concreto*

"La resistencia a la tracción representa aproximadamente entre un 10% y 15 % de su capacidad a la compresión, es por ello que en el hormigón armado se asume que los esfuerzos de tracción son absorbidos por el acero de refuerzo."[54]

Gráfico # 19 Esquema para ensayo de Tracción Indirecta



Fuente: *Norma ASTM-496.*

c) Densidad del Hormigón Endurecido

La densidad del hormigón endurecido se define como el peso por unidad de volumen, para realizar este ensayo el cilindro debe estar en condición de saturado superficie seca (sss), y se calcula mediante la siguiente expresión:[55]

$$D_{HE} = \frac{m_c}{v_c}$$

Donde:

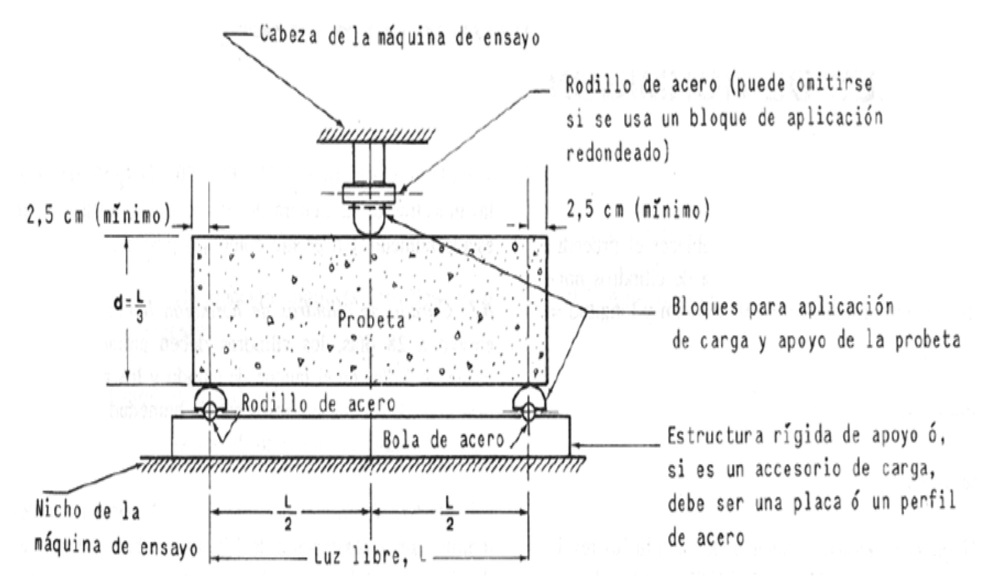
D_{HE} = Densidad del hormigón endurecido, (kg/m3)
m_c = Masa del cilindro del hormigón en condición sss, (kg)
v_c = Volumen del cilindro de hormigón (m3)

[54] *JIMENEZ, M., Hormigón Armado, pp 105*
[55] [55] *NTE INEN 1573. Determinación de la resistencia a compresión de especímenes cilíndricos.*

d) **Resistencia a la Flexión del Hormigón con una carga puntual en el centro de la luz**

"Las probetas para este ensayo se moldean de acuerdo a la normas NTE INEN 1576[56] - ASTM C-31. Este ensayo permite determinar la resistencia a la flexión de especímenes de concreto mediante el empleo de una viga de hormigón apoyada libremente en los extremos que es cargada al centro de la luz libre hasta que ocurra la rotura del espécimen."[57]

Gráfico # 20 Esquema para determinar la resistencia a flexión del concreto con aplicación de carga al centro de la luz



Fuente: *Norma ASTM-293.*

Procedimiento:

"Se debe girar la muestra de ensayo sobre uno de sus lados respecto a la posición de moldeado y centrarlo en los bloques de apoyo. A continuación se coloca el bloque de aplicación de la carga hasta hacer contacto con la superficie de la probeta en su centro y aplicar la carga entre el 3% y el 6% de la carga última estimada.

[56] *Norma NTE INEN 1576. Elaboración y curado en obra de cilindros*
[57] *Norma ASTM-293. Ensayos de Flexión en vigas de Hormigón simplemente apoyadas con una carga centrada aplicada en el centro de la luz.*

Si no se obtiene un contacto completo entre la probeta y el bloque de aplicación de carga, es necesario pulir las superficies o rellenarlas con láminas de cuero para eliminar cualquier vacío o separación mayor a 0.1 mm (0.004"). El pulido de las superficies debe ser mínimo de tal manera que no cambien las características físicas de la probeta. La resistencia a la flexión se expresa como el Módulo de Rotura y representa aproximadamente entre un 10% y 20 % de su resistencia a compresión y se calcula mediante la siguiente expresión:”[58]

$$Mr = \frac{3 * P * L}{2 * b * h^2}$$

Donde:

Mr = Módulo de Rotura, (kg/cm2)
P = Carga Máxima aplicada, (kg)
L = Luz libre entre apoyos de la probeta, (cm)
b = Ancho de la probeta, (cm)
h = Altura de la probeta, (cm)

Determinación de la Deflexión en Vigas de Hormigón

“Existe un gran número de normas que establecen las condiciones de ensayo y parámetros para evaluar y cuantificar el efecto de la incorporación de fibras en el hormigón, debido a que su resistencia al adicionar fibras no disminuye bruscamente a partir del inicio de la fisuración, conduciendo a una disipación progresiva de la energía durante el proceso de rotura. La tenacidad del material se puede definir como el parámetro que cuantifica esta capacidad de absorción de energía. Si bien la tenacidad como tal, no es usual que se utilice directamente como parámetro de cálculo, su caracterización es fundamental para representar el efecto de la incorporación de fibras en el hormigón.”[59]

[58] *Norma ASTM-293. Ensayos de Flexión en vigas de Hormigón simplemente apoyadas con una carga centrada aplicada en el centro de la luz.*
[59] *CARMONA, Sergio. Control de la tenacidad de los hormigones reforzados con fibras*

En el Gráfico # 21 se presenta el comportamiento característico del hormigón a flexión, en donde se visualiza de forma cualitativa el efecto de la presencia de las fibras sobre la respuesta del hormigón en términos de las curvas carga-deflexión.

Gráfico # 21 Curvas Carga - Desplazamiento típico para hormigón en masa (HN) y hormigones reforzados con fibras (HRF)

Fuente: *CARMONA, Sergio. Hormigones reforzados con fibras*

En esta investigación para evaluar el efecto de la incorporación de las fibras en el hormigón se utilizará el ensayo de flexión con carga puntual en el centro de la luz dada por la norma ASTM C-293, y las curvas Carga – Deflexión serán obtenidas mediante la utilización de un equipo sencillo llamado Deflectómetro provisto de un brazo mecánico y un dial de deformación que mide la deflexión vertical en el centro de la viga en relación a la aplicación de la carga, permitiendo evaluar el comportamiento del hormigón a partir de la formación de las primeras fisuras.

Procedimiento

Preparar la viga para el ensayo de flexión de acuerdo a la norma ASTM C-293, a continuación colocar el deflectómetro bajo la viga al centro del claro, encerar el dial de deformación y la máquina de ensayo.

Se debe tener en cuenta que la carga será aplicada a una razón constante y sin impacto a una velocidad de 3 a 5 kg/seg, siendo una velocidad relativamente lenta para desarrollar este ensayo, con duración estimada de 20 a 30 minutos. Se debe retirar el deflectómetro antes que ocurra la falla total de la viga porque podría dañarse el equipo.

Tomar las lecturas de deformación cada 50 kg hasta el 50% de la carga máxima estimada, y cada 100 kg hasta la falla total de muestra ensayada. Realizar la curva Carga – Desplazamiento en función de los datos obtenidos.[60]

Gráfico # 22 Deflectómetro





Gráfico # 23 Brazo Mecánico del Deflectómetro



Fuente: *Laboratorio de Ingeniería Civil, Universidad Técnica de Ambato*

[60] *BONILLA, Nelly. Tesis de grado 142. FICM-UTA*

6.7 METODOLOGÍA

6.7.1 Dosificación de Hormigón para Agregados de la Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias

Tabla # 39 Dosificación para Hormigón de f´c =210 kg/cm2 con Agregados de la Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO					
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA					
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL					
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA					
DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN MÉTODO DE LA UNIVERSIDAD CENTRAL					
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos		**FECHA:**	15/05/2013	
REALIZADO POR:	Egda. María Fernanda Millán		**DATOS DE TABLAS**		
DATOS DE ENSAYOS			**% Aire (dm3)**		20
f´c	**210**	**kg/cm2**	**(w/c)**		**0,62**
Asentamiento	**6 - 9**	**cm**	**(k)**		**1,11**
DRC	3,045	gr./cm3	**CÁLCULOS**		
DRA	2,611	gr./cm3	PEM	2,619	kg./dm3
DRR	2,624	gr./cm3	POV	27,920	%
DSA	1,316	gr./cm3	CP	309,914	dm3
DSR	1,306	gr./cm3	C	326,774	kg.
POA	36	%	W	202,600	lts.
POR	64	%	A	629,854	kg.
PUOM	1,888	gr./cm3	R	1125,315	kg.

DOSIFICACIÓN AL PESO

MATERIAL	CANTIDAD EN (KG) POR CADA M3 DE HORMIGÓN	DOSIFICACIÓN AL PESO	CANTIDAD EN (KG) POR SACO DE CEMENTO DE 50kg.
W	202,600	0,62	31,00
C	326,774	1,00	50,00
A	629,854	1,93	96,37
R	1125,315	3,44	172,19
TOTAL	**2284,542**	**kg./m3 Densidad del Hormigón**	

DOSIFICACIÓN AL VOLUMEN

MATERIAL	PESO UNITARIO SUELTO (Kg./dm3)	VOLUMEN APARENTE EN (dm3) POR m3	VOLUMEN APARENTE EN (dm3) POR SACO DE CEMENTO	DOSIFICACIÓN AL VOLUMEN EN OBRA PARA UN SACO CEM.	
W	-	202,600	31,00	31,00	lts.
C	-	326,774	50,00	1	saco
A	1,316	478,612	73,23	2,7	parihuelas
R	1,306	861,650	131,84	4,9	parihuelas
VOLUMEN REAL DEL HORMIGÓN			***286,07***	***dm3 c/saco***	
DIMENSIONES DE PARIHUELA: B = L = H = 3.00 dm			**VOLUMEN PARIHUELA**	27,00	dm3

NOMENCLATURA

DRC	Densidad Real del Cemento	PUOM	Peso Unitario Óptimo Mezcla
DRA	Densidad Real de la Arena	PEM	Peso Específico de la Mezcla
DRR	Densidad Real del Ripio	POV	Porcentaje Óptimo de Vacíos
DSA	Densidad Suelta de Arena	CP	Cantidad de Pasta
DSR	Densidad Suelta de Ripio	C	Cantidad de Cemento
POA	Porcentaje Óptimo Arena	W	Cantidad de Agua
POR	Porcentaje Óptimo Ripio	A	Cantidad de Arena
w/c	Relación Agua/Cemento	R	Cantidad de Ripio
k	Factor de Corrección de Asentamiento		

Tabla # 40 Dosificación para Hormigón de f´c= 240 kg/cm2 con Agregados de la Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO					
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA					
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL					
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA					
DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN MÉTODO DE LA UNIVERSIDAD CENTRAL					
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos		**FECHA:**	15/05/2013	
REALIZADO POR:	Egda. María Fernanda Millán		**DATOS DE TABLAS**		
DATOS DE ENSAYOS			**% Aire (dm3)**		20
f´c	**240**	**kg/cm2**	**(w/c)**		**0,59**
Asentamiento	**6 - 9**	**cm**	**(k)**		**1,11**
DRC	3,045	gr./cm3	**CÁLCULOS**		
DRA	2,611	gr./cm3	PEM	2,619	kg./dm3
DRR	2,624	gr./cm3	POV	27,920	%
DSA	1,316	gr./cm3	CP	309,914	dm3
DSR	1,306	gr./cm3	C	337,448	kg.
POA	36	%	W	199,094	lts.
POR	64	%	A	629,854	kg.
PUOM	1,888	gr./cm3	R	1125,315	kg.

DOSIFICACIÓN AL PESO			
MATERIAL	**CANTIDAD EN (KG) POR CADA M3 DE HORMIGÓN**	**DOSIFICACIÓN AL PESO**	**CANTIDAD EN (KG) POR SACO DE CEMENTO DE 50kg.**
W	199,094	0,59	29,50
C	337,448	1,00	50,00
A	629,854	1,87	93,33
R	1125,315	3,33	166,74
TOTAL	**2291,710**	**kg./m3 Densidad del Hormigón**	

DOSIFICACIÓN AL VOLUMEN					
MATERIAL	**PESO UNITARIO SUELTO (Kg./dm3)**	**VOLUMEN APARENTE EN (dm3) POR m3**	**VOLUMEN APARENTE EN (dm3) POR SACO DE CEMENTO**	**DOSIFICACIÓN AL VOLUMEN EN OBRA PARA UN SACO CEM.**	
W	-	199,094	29,50	29,50	lts.
C	-	337,448	50,00	1	saco
A	1,316	478,612	70,92	2,6	parihuelas
R	1,306	861,650	127,67	4,7	parihuelas
VOLUMEN REAL DEL HORMIGÓN			***278,09***	***dm3 c/saco***	
DIMENSIONES DE PARIHUELA: B = L = H = 3.00 dm			**VOLUMEN PARIHUELA**	27,00	dm3

NOMENCLATURA

DRC	Densidad Real del Cemento	PUOM	Peso Unitario Óptimo Mezcla
DRA	Densidad Real de la Arena	PEM	Peso Específico de la Mezcla
DRR	Densidad Real del Ripio	POV	Porcentaje Óptimo de Vacíos
DSA	Densidad Suelta de Arena	CP	Cantidad de Pasta
DSR	Densidad Suelta de Ripio	C	Cantidad de Cemento
POA	Porcentaje Óptimo Arena	W	Cantidad de Agua
POR	Porcentaje Óptimo Ripio	A	Cantidad de Arena
w/c	Relación Agua/Cemento	R	Cantidad de Ripio
k	Factor de Corrección de Asentamiento		

6.7.2 Dosificación de la Fibra de Polipropileno Tipo Multifilamento

Se tomarán seis muestras de cilindros y una muestra de viga para cada dosificación de hormigón de acuerdo a la norma NTE INEN 1576[61], los mismos que estarán constituidos por distintas concentraciones de fibra comprendidos entre 0,1% al 0,3% del volumen de hormigón, según las recomendaciones dadas por la norma ACI-544.2R[62] con incrementos del 0,05% de fibra, y además se tomarán seis muestras de cilindros y una muestra de viga de hormigón simple como referencia (sin fibra) con el propósito de compararlo con el hormigón reforzado con fibra.

6.7.2.1 Dosificación Fibra de Polipropileno Tipo Multifilamento en Cilindros

Tabla # 41 Dosificación para 0,10% de Fibra de Polipropileno en cilindros de hormigón f´c =210 kg/cm2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO			
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA			
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA			
DOSIFICACIÓN PARA 0,10 % DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN CILINDROS DE HORMIGÓN f´c=210 kg/cm2			
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias		
REALIZADO POR:	Egda. María Fernanda Millán	FECHA:	15/05/2013
DATOS	REFERENCIA	UNIDADES	DATOS
# Cilindros	NÚMERO DE CILINDROS	u	6
D	DIÁMETRO DE CILINDRO	m	0,15
H	ALTURA DE CILINDRO	m	0,30
AC	ÁREA DEL CILINDRO	m2	0,02
VC	VOLUMEN DEL CILINDRO	m3	0,01
DH	DENSIDAD HORMIGÓN	kg/m3	2284,54
MCH	MASA DE CADA CILINDRO DE HORMIGÓN	kg	12,11
MHC	MASA DE HORMIGÓN PARA CILINDROS	kg	72,67
VHC	VOLUMEN DE HORMIGÓN NECESARIO PARA CILINDROS	m3	0,03
DFp	DENSIDAD DE LA FIBRA DE POLIPROPILENO	gr/cm3	0,9
%Fp	% FIBRA DE POLIPROPILENO EN EL HORMIGÓN	%	0,1
VFp	VOLUMEN DE FIBRA DE POLIPROPILENO	m3	0,001
MFp	MASA DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN HORMIGÓN	kg cada m3	0,9
CFpC	CANTIDAD DE FIBRA DE POLIPROPILENO PARA CILINDROS	gr	28,63

---

[61] *NTE INEN 1576. Elaboración y curado en obra de especímenes para ensayo de cilindros*
[62] *ACI, "Report on Fiber Reinforced Concrete", p. 544.1R-47, literal 4.3.7 "Polypropylene FRC"*

Tabla # 42 Dosificación para 0,15% de Fibra de Polipropileno en cilindros de hormigón f´c =210 kg/cm2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO			
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA			
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA			
DOSIFICACIÓN PARA 0,15 % DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN CILINDROS DE HORMIGÓN f´c=210 kg/cm2			
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias		
REALIZADO POR:	Egda. María Fernanda Millán	FECHA:	15/05/2013
DATOS	REFERENCIA	UNIDADES	DATOS
# Cilindros	NÚMERO DE CILINDROS	u	6
D	DIÁMETRO DE CILINDRO	m	0,15
H	ALTURA DE CILINDRO	m	0,30
AC	ÁREA DEL CILINDRO	m2	0,02
VC	VOLUMEN DEL CILINDRO	m3	0,01
DH	DENSIDAD HORMIGÓN	kg/m3	2284,54
MCH	MASA DE CADA CILINDRO DE HORMIGÓN	kg	12,11
MHC	MASA DE HORMIGÓN PARA CILINDROS	kg	72,67
VHC	VOLUMEN DE HORMIGÓN NECESARIO PARA CILINDROS	m3	0,03
DFp	DENSIDAD DE LA FIBRA DE POLIPROPILENO	gr/cm3	0,9
%Fp	% FIBRA DE POLIPROPILENO EN EL HORMIGÓN	%	0,15
VFp	VOLUMEN DE FIBRA DE POLIPROPILENO	m3	0,0015
MFp	MASA DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN HORMIGÓN	kg cada m3	1,35
CFpC	CANTIDAD DE FIBRA DE POLIPROPILENO PARA CILINDROS	gr	42,94

Tabla # 43 Dosificación para 0,20% de Fibra de Polipropileno en cilindros de hormigón f´c =210 kg/cm2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO			
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA			
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA			
DOSIFICACIÓN PARA 0,20 % DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN CILINDROS DE HORMIGÓN f´c=210 kg/cm2			
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias		
REALIZADO POR:	Egda. María Fernanda Millán	FECHA:	15/05/2013
DATOS	REFERENCIA	UNIDADES	DATOS
# Cilindros	NÚMERO DE CILINDROS	u	6
D	DIÁMETRO DE CILINDRO	m	0,15
H	ALTURA DE CILINDRO	m	0,30
AC	ÁREA DEL CILINDRO	m2	0,02
VC	VOLUMEN DEL CILINDRO	m3	0,01
DH	DENSIDAD HORMIGÓN	kg/m3	2284,54
MCH	MASA DE CADA CILINDRO DE HORMIGÓN	kg	12,11
MHC	MASA DE HORMIGÓN PARA CILINDROS	kg	72,67
VHC	VOLUMEN DE HORMIGÓN NECESARIO PARA CILINDROS	m3	0,03
DFp	DENSIDAD DE LA FIBRA DE POLIPROPILENO	gr/cm3	0,9
%Fp	% FIBRA DE POLIPROPILENO EN EL HORMIGÓN	%	0,2
VFp	VOLUMEN DE FIBRA DE POLIPROPILENO	m3	0,002
MFp	MASA DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN HORMIGÓN	kg cada m3	1,8
CFpC	CANTIDAD DE FIBRA DE POLIPROPILENO PARA CILINDROS	gr	57,26

Tabla # 44 Dosificación para 0,25% de Fibra de Polipropileno en cilindros de hormigón f´c =210 kg/cm2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO			
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA			
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA			
DOSIFICACIÓN PARA 0,25 % DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN CILINDROS DE HORMIGÓN f´c=210 kg/cm2			
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias		
REALIZADO POR:	Egda. María Fernanda Millán	FECHA:	15/05/2013
DATOS	REFERENCIA	UNIDADES	DATOS
# Cilindros	NÚMERO DE CILINDROS	u	6
D	DIÁMETRO DE CILINDRO	m	0,15
H	ALTURA DE CILINDRO	m	0,30
AC	ÁREA DEL CILINDRO	m2	0,02
VC	VOLUMEN DEL CILINDRO	m3	0,01
DH	DENSIDAD HORMIGÓN	kg/m3	2284,54
MCH	MASA DE CADA CILINDRO DE HORMIGÓN	kg	12,11
MHC	MASA DE HORMIGÓN PARA CILINDROS	kg	72,67
VHC	VOLUMEN DE HORMIGÓN NECESARIO PARA CILINDROS	m3	0,03
DFp	DENSIDAD DE LA FIBRA DE POLIPROPILENO	gr/cm3	0,9
%Fp	% FIBRA DE POLIPROPILENO EN EL HORMIGÓN	%	0,25
VFp	VOLUMEN DE FIBRA DE POLIPROPILENO	m3	0,0025
MFp	MASA DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN HORMIGÓN	kg cada m3	2,25
CFpC	CANTIDAD DE FIBRA DE POLIPROPILENO PARA CILINDROS	gr	71,57

Tabla # 45 Dosificación para 0,30% de Fibra de Polipropileno en cilindros de hormigón f´c =210 kg/cm2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO			
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA			
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA			
DOSIFICACIÓN PARA 0,30 % DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN CILINDROS DE HORMIGÓN f´c=210 kg/cm2			
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias		
REALIZADO POR:	Egda. María Fernanda Millán	FECHA:	15/05/2013
DATOS	REFERENCIA	UNIDADES	DATOS
# Cilindros	NÚMERO DE CILINDROS	u	6
D	DIÁMETRO DE CILINDRO	m	0,15
H	ALTURA DE CILINDRO	m	0,30
AC	ÁREA DEL CILINDRO	m2	0,02
VC	VOLUMEN DEL CILINDRO	m3	0,01
DH	DENSIDAD HORMIGÓN	kg/m3	2284,54
MCH	MASA DE CADA CILINDRO DE HORMIGÓN	kg	12,11
MHC	MASA DE HORMIGÓN PARA CILINDROS	kg	72,67
VHC	VOLUMEN DE HORMIGÓN NECESARIO PARA CILINDROS	m3	0,03
DFp	DENSIDAD DE LA FIBRA DE POLIPROPILENO	gr/cm3	0,9
%Fp	% FIBRA DE POLIPROPILENO EN EL HORMIGÓN	%	0,3
VFp	VOLUMEN DE FIBRA DE POLIPROPILENO	m3	0,003
MFp	MASA DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN HORMIGÓN	kg cada m3	2,7
CFpC	CANTIDAD DE FIBRA DE POLIPROPILENO PARA CILINDROS	gr	85,88

Tabla # 46 Dosificación para 0,10 % de Fibra de Polipropileno en cilindros de hormigón f´c =240 kg/cm2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO			
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA			
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA			
DOSIFICACIÓN PARA 0,10% DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN CILINDROS DE HORMIGÓN f´c=240 kg/cm2			
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias		
REALIZADO POR:	Egda. María Fernanda Millán	**FECHA:**	15/05/2013
DATOS	**REFERENCIA**	**UNIDADES**	**DATOS**
# Cilindros	NÚMERO DE CILINDROS	u	6
D	DIÁMETRO DE CILINDRO	m	0,15
H	ALTURA DE CILINDRO	m	0,30
AC	ÁREA DEL CILINDRO	m2	0,02
VC	VOLUMEN DEL CILINDRO	m3	0,01
DH	DENSIDAD HORMIGÓN	kg/m3	2291,71
MCH	MASA DE CADA CILINDRO DE HORMIGÓN	kg	12,15
MHC	MASA DE HORMIGÓN PARA CILINDROS	kg	72,90
VHC	VOLUMEN DE HORMIGÓN NECESARIO PARA CILINDROS	m3	0,03
DFp	DENSIDAD DE LA FIBRA DE POLIPROPILENO	gr/cm3	0,9
%Fp	% FIBRA DE POLIPROPILENO EN EL HORMIGÓN	%	0,1
VFp	VOLUMEN DE FIBRA DE POLIPROPILENO	m3	0,001
MFp	MASA DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN HORMIGÓN	kg cada m3	0,9
CFpC	CANTIDAD DE FIBRA DE POLIPROPILENO PARA CILINDROS	gr	28,63

Tabla # 47 Dosificación para 0,15 % de Fibra de Polipropileno en cilindros de hormigón f´c =240 kg/cm2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO			
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA			
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA			
DOSIFICACIÓN PARA 0,15% DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN CILINDROS DE HORMIGÓN f´c=240 kg/cm2			
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias		
REALIZADO POR:	Egda. María Fernanda Millán	**FECHA:**	15/05/2013
DATOS	**REFERENCIA**	**UNIDADES**	**DATOS**
# Cilindros	NÚMERO DE CILINDROS	u	6
D	DIÁMETRO DE CILINDRO	m	0,15
H	ALTURA DE CILINDRO	m	0,30
AC	ÁREA DEL CILINDRO	m2	0,02
VC	VOLUMEN DEL CILINDRO	m3	0,01
DH	DENSIDAD HORMIGÓN	kg/m3	2291,71
MCH	MASA DE CADA CILINDRO DE HORMIGÓN	kg	12,15
MHC	MASA DE HORMIGÓN PARA CILINDROS	kg	72,90
VHC	VOLUMEN DE HORMIGÓN NECESARIO PARA CILINDROS	m3	0,03
DFp	DENSIDAD DE LA FIBRA DE POLIPROPILENO	gr/cm3	0,9
%Fp	% FIBRA DE POLIPROPILENO EN EL HORMIGÓN	%	0,15
VFp	VOLUMEN DE FIBRA DE POLIPROPILENO	m3	0,0015
MFp	MASA DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN HORMIGÓN	kg cada m3	1,35
CFpC	CANTIDAD DE FIBRA DE POLIPROPILENO PARA CILINDROS	gr	42,94

Tabla # 48 Dosificación para 0,20 % de Fibra de Polipropileno en cilindros de hormigón f´c =240 kg/cm2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO			
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA			
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA			
DOSIFICACIÓN PARA 0,20% DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN CILINDROS DE HORMIGÓN f´c=240 kg/cm2			
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias		
REALIZADO POR:	Egda. María Fernanda Millán	**FECHA:**	15/05/2013
DATOS	**REFERENCIA**	**UNIDADES**	**DATOS**
# Cilindros	NÚMERO DE CILINDROS	u	6
D	DIÁMETRO DE CILINDRO	m	0,15
H	ALTURA DE CILINDRO	m	0,30
AC	ÁREA DEL CILINDRO	m2	0,02
VC	VOLUMEN DEL CILINDRO	m3	0,01
DH	DENSIDAD HORMIGÓN	kg/m3	2291,71
MCH	MASA DE CADA CILINDRO DE HORMIGÓN	kg	12,15
MHC	MASA DE HORMIGÓN PARA CILINDROS	kg	72,90
VHC	VOLUMEN DE HORMIGÓN NECESARIO PARA CILINDROS	m3	0,03
DFp	DENSIDAD DE LA FIBRA DE POLIPROPILENO	gr/cm3	0,9
%Fp	% FIBRA DE POLIPROPILENO EN EL HORMIGÓN	%	0,2
VFp	VOLUMEN DE FIBRA DE POLIPROPILENO	m3	0,002
MFp	MASA DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN HORMIGÓN	kg cada m3	1,8
CFpC	CANTIDAD DE FIBRA DE POLIPROPILENO PARA CILINDROS	gr	57,26

Tabla # 49 Dosificación para 0,25 % de Fibra de Polipropileno en cilindros de hormigón f´c =240 kg/cm2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO			
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA			
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA			
DOSIFICACIÓN PARA 0,25% DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN CILINDROS DE HORMIGÓN f´c=240 kg/cm2			
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias		
REALIZADO POR:	Egda. María Fernanda Millán	**FECHA:**	15/05/2013
DATOS	**REFERENCIA**	**UNIDADES**	**DATOS**
# Cilindros	NÚMERO DE CILINDROS	u	6
D	DIÁMETRO DE CILINDRO	m	0,15
H	ALTURA DE CILINDRO	m	0,30
AC	ÁREA DEL CILINDRO	m2	0,02
VC	VOLUMEN DEL CILINDRO	m3	0,01
DH	DENSIDAD HORMIGÓN	kg/m3	2291,71
MCH	MASA DE CADA CILINDRO DE HORMIGÓN	kg	12,15
MHC	MASA DE HORMIGÓN PARA CILINDROS	kg	72,90
VHC	VOLUMEN DE HORMIGÓN NECESARIO PARA CILINDROS	m3	0,03
DFp	DENSIDAD DE LA FIBRA DE POLIPROPILENO	gr/cm3	0,9
%Fp	% FIBRA DE POLIPROPILENO EN EL HORMIGÓN	%	0,25
VFp	VOLUMEN DE FIBRA DE POLIPROPILENO	m3	0,0025
MFp	MASA DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN HORMIGÓN	kg cada m3	2,25
CFpC	CANTIDAD DE FIBRA DE POLIPROPILENO PARA CILINDROS	gr	71,57

Tabla # 50 Dosificación para 0,30 % de Fibra de Polipropileno en cilindros de hormigón f´c =240 kg/cm2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO			
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA			
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA			
DOSIFICACIÓN PARA 0,30% DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN CILINDROS DE HORMIGÓN f´c=240 kg/cm2			
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias		
REALIZADO POR:	Egda. María Fernanda Millán	**FECHA:**	15/05/2013
DATOS	**REFERENCIA**	**UNIDADES**	**DATOS**
# Cilindros	NÚMERO DE CILINDROS	u	6
D	DIÁMETRO DE CILINDRO	m	0,15
H	ALTURA DE CILINDRO	m	0,30
AC	ÁREA DEL CILINDRO	m2	0,02
VC	VOLUMEN DEL CILINDRO	m3	0,01
DH	DENSIDAD HORMIGÓN	kg/m3	2291,71
MCH	MASA DE CADA CILINDRO DE HORMIGÓN	kg	12,15
MHC	MASA DE HORMIGÓN PARA CILINDROS	kg	72,90
VHC	VOLUMEN DE HORMIGÓN NECESARIO PARA CILINDROS	m3	0,03
DFp	DENSIDAD DE LA FIBRA DE POLIPROPILENO	gr/cm3	0,9
%Fp	% FIBRA DE POLIPROPILENO EN EL HORMIGÓN	%	0,3
VFp	VOLUMEN DE FIBRA DE POLIPROPILENO	m3	0,003
MFp	MASA DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN HORMIGÓN	kg cada m3	2,7
CFpC	CANTIDAD DE FIBRA DE POLIPROPILENO PARA CILINDROS	gr	85,88

6.7.2.2 Dosificación de Fibra de Polipropileno Tipo Multifilamento en Vigas

Tabla # 51 Dosificación para 0,10 % de Fibra de Polipropileno en Vigas de hormigón f´c =210 kg/cm2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO			
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA			
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA			
DOSIFICACIÓN PARA 0,10% DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN VIGAS DE HORMIGÓN f´c=210 kg/cm2			
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias		
REALIZADO POR:	Egda. María Fernanda Millán	**FECHA:**	15/05/2013
DATOS	**REFERENCIA**	**UNIDADES**	**DATOS**
# Vigas	NÚMERO DE VIGAS	u	1
Lv	LONGITUD DE VIGA	m	0,75
Av	ANCHO DE VIGA	m	0,15
Hv	ALTURA DE VIGA	m	0,15
Área V	AREA DE VIGA	m2	0,113
VV	VOLUMEN DE VIGA	m3	0,0169
DH	DENSIDAD DEL HORMIGÓN	kg/m3	2284,54
MVH	MASA DE CADA VIGA DE HORMIGÓN	kg	38,55
MHV	MASA DE HORMIGÓN PARA VIGAS	kg	38,55
VHV	VOLUMEN DE HORMIGÓN NECESARIO PARA VIGAS	m3	0,017
DFp	DENSIDAD DE LA FIBRA DE POLIPROPILENO	gr/cm3	0,9
% Fp	% FIBRA DE POLIPROPILENO EN EL HORMIGÓN	%	0,1
VFp	VOLUMEN DE FIBRA DE POLIPROPILENO	m3	1
MFp	MASA DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN HORMIGÓN	kg cada m3	0,9
CFpV	CANTIDAD DE FIBRA DE POLIPROPILENO PARA VIGAS	gr	15,19

Tabla # 52 Dosificación para 0,15 % de Fibra de Polipropileno en Vigas de hormigón f´c =210 kg/cm2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO			
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA			
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA			
DOSIFICACIÓN PARA 0,15% DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN VIGAS DE HORMIGÓN f´c=210 kg/cm2			
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias		
REALIZADO POR:	Egda. María Fernanda Millán	FECHA:	15/05/2013
DATOS	REFERENCIA	UNIDADES	DATOS
# Vigas	NÚMERO DE VIGAS	u	1
Lv	LONGITUD DE VIGA	m	0,75
Av	ANCHO DE VIGA	m	0,15
Hv	ALTURA DE VIGA	m	0,15
Área V	AREA DE VIGA	m2	0,113
VV	VOLUMEN DE VIGA	m3	0,0169
DH	DENSIDAD DEL HORMIGÓN	kg/m3	2284,54
MVH	MASA DE CADA VIGA DE HORMIGÓN	kg	38,55
MHV	MASA DE HORMIGÓN PARA VIGAS	kg	38,55
VHV	VOLUMEN DE HORMIGÓN NECESARIO PARA VIGAS	m3	0,017
DFp	DENSIDAD DE LA FIBRA DE POLIPROPILENO	gr/cm3	0,9
% Fp	% FIBRA DE POLIPROPILENO EN EL HORMIGÓN	%	0,15
VFp	VOLUMEN DE FIBRA DE POLIPROPILENO	m3	1,5
MFp	MASA DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN HORMIGÓN	kg cada m3	1,35
CFpV	CANTIDAD DE FIBRA DE POLIPROPILENO PARA VIGAS	gr	22,78

Tabla # 53 Dosificación para 0,20 % de Fibra de Polipropileno en Vigas de hormigón f´c =210 kg/cm2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO			
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA			
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA			
DOSIFICACIÓN PARA 0,20% DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN VIGAS DE HORMIGÓN f´c=210 kg/cm2			
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias		
REALIZADO POR:	Egda. María Fernanda Millán	FECHA:	15/05/2013
DATOS	REFERENCIA	UNIDADES	DATOS
# Vigas	NÚMERO DE VIGAS	u	1
Lv	LONGITUD DE VIGA	m	0,75
Av	ANCHO DE VIGA	m	0,15
Hv	ALTURA DE VIGA	m	0,15
Área V	AREA DE VIGA	m2	0,113
VV	VOLUMEN DE VIGA	m3	0,0169
DH	DENSIDAD DEL HORMIGÓN	kg/m3	2284,54
MVH	MASA DE CADA VIGA DE HORMIGÓN	kg	38,55
MHV	MASA DE HORMIGÓN PARA VIGAS	kg	38,55
VHV	VOLUMEN DE HORMIGÓN NECESARIO PARA VIGAS	m3	0,017
DFp	DENSIDAD DE LA FIBRA DE POLIPROPILENO	gr/cm3	0,9
% Fp	% FIBRA DE POLIPROPILENO EN EL HORMIGÓN	%	0,2
VFp	VOLUMEN DE FIBRA DE POLIPROPILENO	m3	2
MFp	MASA DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN HORMIGÓN	kg cada m3	1,8
CFpV	CANTIDAD DE FIBRA DE POLIPROPILENO PARA VIGAS	gr	30,38

Tabla # 54 Dosificación para 0,25 % de Fibra de Polipropileno en Vigas de hormigón f´c =210 kg/cm2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO			
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA			
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA			
DOSIFICACIÓN PARA 0,25% DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN VIGAS DE HORMIGÓN f´c=210 kg/cm2			
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias		
REALIZADO POR:	Egda. María Fernanda Millán	**FECHA:**	15/05/2013
DATOS	**REFERENCIA**	**UNIDADES**	**DATOS**
# Vigas	NÚMERO DE VIGAS	u	1
Lv	LONGITUD DE VIGA	m	0,75
Av	ANCHO DE VIGA	m	0,15
Hv	ALTURA DE VIGA	m	0,15
Área V	AREA DE VIGA	m2	0,113
VV	VOLUMEN DE VIGA	m3	0,0169
DH	DENSIDAD DEL HORMIGÓN	kg/m3	2284,54
MVH	MASA DE CADA VIGA DE HORMIGÓN	kg	38,55
MHV	MASA DE HORMIGÓN PARA VIGAS	kg	38,55
VHV	VOLUMEN DE HORMIGÓN NECESARIO PARA VIGAS	m3	0,017
DFp	DENSIDAD DE LA FIBRA DE POLIPROPILENO	gr/cm3	0,9
% Fp	% FIBRA DE POLIPROPILENO EN EL HORMIGÓN	%	0,25
VFp	VOLUMEN DE FIBRA DE POLIPROPILENO	m3	2,5
MFp	MASA DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN HORMIGÓN	kg cada m3	2,25
CFpV	CANTIDAD DE FIBRA DE POLIPROPILENO PARA VIGAS	gr	37,97

Tabla # 55 Dosificación para 0,30 % de Fibra de Polipropileno en Vigas de hormigón f´c =210 kg/cm2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO			
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA			
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA			
DOSIFICACIÓN PARA 0,30% DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN VIGAS DE HORMIGÓN f´c=210 kg/cm2			
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias		
REALIZADO POR:	Egda. María Fernanda Millán	**FECHA:**	15/05/2013
DATOS	**REFERENCIA**	**UNIDADES**	**DATOS**
# Vigas	NÚMERO DE VIGAS	u	1
Lv	LONGITUD DE VIGA	m	0,75
Av	ANCHO DE VIGA	m	0,15
Hv	ALTURA DE VIGA	m	0,15
Área V	AREA DE VIGA	m2	0,113
VV	VOLUMEN DE VIGA	m3	0,0169
DH	DENSIDAD DEL HORMIGÓN	kg/m3	2284,54
MVH	MASA DE CADA VIGA DE HORMIGÓN	kg	38,55
MHV	MASA DE HORMIGÓN PARA VIGAS	kg	38,55
VHV	VOLUMEN DE HORMIGÓN NECESARIO PARA VIGAS	m3	0,017
DFp	DENSIDAD DE LA FIBRA DE POLIPROPILENO	gr/cm3	0,9
% Fp	% FIBRA DE POLIPROPILENO EN EL HORMIGÓN	%	0,3
VFp	VOLUMEN DE FIBRA DE POLIPROPILENO	m3	3
MFp	MASA DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN HORMIGÓN	kg cada m3	2,7
CFpV	CANTIDAD DE FIBRA DE POLIPROPILENO PARA VIGAS	gr	45,56

Tabla # 56 Dosificación para 0,10 % de Fibra de Polipropileno en Vigas de hormigón f´c =240 kg/cm2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO			
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA			
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA			
DOSIFICACIÓN PARA 0,10% DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN VIGAS DE HORMIGÓN f´c=240 kg/cm2			
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias		
REALIZADO POR:	Egda. María Fernanda Millán	**FECHA:**	15/05/2013
DATOS	**REFERENCIA**	**UNIDADES**	**DATOS**
# Vigas	NÚMERO DE VIGAS	u	1
Lv	LONGITUD DE VIGA	m	0,75
Av	ANCHO DE VIGA	m	0,15
Hv	ALTURA DE VIGA	m	0,15
Área V	AREA DE VIGA	m2	0,113
VV	VOLUMEN DE VIGA	m3	0,0169
DH	DENSIDAD DEL HORMIGÓN	kg/m3	2291,71
MVH	MASA DE CADA VIGA DE HORMIGÓN	kg	38,673
MHV	MASA DE HORMIGÓN PARA VIGAS	kg	38,673
VHV	VOLUMEN DE HORMIGÓN NECESARIO PARA VIGAS	m3	0,0169
DFp	DENSIDAD DE LA FIBRA DE POLIPROPILENO	gr/cm3	0,9
% Fp	% FIBRA DE POLIPROPILENO EN EL HORMIGÓN	%	0,1
VFp	VOLUMEN DE FIBRA DE POLIPROPILENO	m3	1
MFp	MASA DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN HORMIGÓN	kg cada m3	0,9
CFpV	CANTIDAD DE FIBRA DE POLIPROPILENO PARA VIGAS	gr	15,19

Tabla # 57 Dosificación para 0,15 % de Fibra de Polipropileno en Vigas de hormigón f´c =240 kg/cm2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO			
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA			
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA			
DOSIFICACIÓN PARA 0,15% DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN VIGAS DE HORMIGÓN f´c=240 kg/cm2			
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias		
REALIZADO POR:	Egda. María Fernanda Millán	**FECHA:**	15/05/2013
DATOS	**REFERENCIA**	**UNIDADES**	**DATOS**
# Vigas	NÚMERO DE VIGAS	u	1
Lv	LONGITUD DE VIGA	m	0,75
Av	ANCHO DE VIGA	m	0,15
Hv	ALTURA DE VIGA	m	0,15
Área V	AREA DE VIGA	m2	0,113
VV	VOLUMEN DE VIGA	m3	0,0169
DH	DENSIDAD DEL HORMIGÓN	kg/m3	2291,71
MVH	MASA DE CADA VIGA DE HORMIGÓN	kg	38,673
MHV	MASA DE HORMIGÓN PARA VIGAS	kg	38,673
VHV	VOLUMEN DE HORMIGÓN NECESARIO PARA VIGAS	m3	0,0169
DFp	DENSIDAD DE LA FIBRA DE POLIPROPILENO	gr/cm3	0,9
% Fp	% FIBRA DE POLIPROPILENO EN EL HORMIGÓN	%	0,15
VFp	VOLUMEN DE FIBRA DE POLIPROPILENO	m3	1,5
MFp	MASA DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN HORMIGÓN	kg cada m3	1,35
CFpV	CANTIDAD DE FIBRA DE POLIPROPILENO PARA VIGAS	gr	22,78

Tabla # 58 Dosificación para 0,20 % de Fibra de Polipropileno en Vigas de hormigón f´c =240 kg/cm2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO			
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA			
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA			
DOSIFICACIÓN PARA 0,20% DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN VIGAS DE HORMIGÓN f´c=240 kg/cm2			
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias		
REALIZADO POR:	Egda. María Fernanda Millán	FECHA:	15/05/2013
DATOS	REFERENCIA	UNIDADES	DATOS
# Vigas	NÚMERO DE VIGAS	u	1
Lv	LONGITUD DE VIGA	m	0,75
Av	ANCHO DE VIGA	m	0,15
Hv	ALTURA DE VIGA	m	0,15
Área V	AREA DE VIGA	m2	0,113
VV	VOLUMEN DE VIGA	m3	0,0169
DH	DENSIDAD DEL HORMIGÓN	kg/m3	2291,71
MVH	MASA DE CADA VIGA DE HORMIGÓN	kg	38,673
MHV	MASA DE HORMIGÓN PARA VIGAS	kg	38,673
VHV	VOLUMEN DE HORMIGÓN NECESARIO PARA VIGAS	m3	0,0169
DFp	DENSIDAD DE LA FIBRA DE POLIPROPILENO	gr/cm3	0,9
% Fp	% FIBRA DE POLIPROPILENO EN EL HORMIGÓN	%	0,2
VFp	VOLUMEN DE FIBRA DE POLIPROPILENO	m3	2
MFp	MASA DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN HORMIGÓN	kg cada m3	1,8
CFpV	CANTIDAD DE FIBRA DE POLIPROPILENO PARA VIGAS	gr	30,38

Tabla # 59 Dosificación para 0,25 % de Fibra de Polipropileno en Vigas de hormigón f´c =240 kg/cm2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO			
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA			
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA			
DOSIFICACIÓN PARA 0,25% DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN VIGAS DE HORMIGÓN f´c=240 kg/cm2			
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias		
REALIZADO POR:	Egda. María Fernanda Millán	FECHA:	15/05/2013
DATOS	REFERENCIA	UNIDADES	DATOS
# Vigas	NÚMERO DE VIGAS	u	1
Lv	LONGITUD DE VIGA	m	0,75
Av	ANCHO DE VIGA	m	0,15
Hv	ALTURA DE VIGA	m	0,15
Área V	AREA DE VIGA	m2	0,113
VV	VOLUMEN DE VIGA	m3	0,0169
DH	DENSIDAD DEL HORMIGÓN	kg/m3	2291,71
MVH	MASA DE CADA VIGA DE HORMIGÓN	kg	38,673
MHV	MASA DE HORMIGÓN PARA VIGAS	kg	38,673
VHV	VOLUMEN DE HORMIGÓN NECESARIO PARA VIGAS	m3	0,0169
DFp	DENSIDAD DE LA FIBRA DE POLIPROPILENO	gr/cm3	0,9
% Fp	% FIBRA DE POLIPROPILENO EN EL HORMIGÓN	%	0,25
VFp	VOLUMEN DE FIBRA DE POLIPROPILENO	m3	2,5
MFp	MASA DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN HORMIGÓN	kg cada m3	2,25
CFpV	CANTIDAD DE FIBRA DE POLIPROPILENO PARA VIGAS	gr	37,97

Tabla # 60 Dosificación para 0,30 % de Fibra de Polipropileno en Vigas de hormigón f´c =240 kg/cm2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO			
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA			
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA			
DOSIFICACIÓN PARA 0,30% DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN VIGAS DE HORMIGÓN f´c=240 kg/cm2			
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias		
REALIZADO POR:	Egda. María Fernanda Millán	**FECHA:**	15/05/2013
DATOS	**REFERENCIA**	**UNIDADES**	**DATOS**
# Vigas	NÚMERO DE VIGAS	u	1
Lv	LONGITUD DE VIGA	m	0,75
Av	ANCHO DE VIGA	m	0,15
Hv	ALTURA DE VIGA	m	0,15
Área V	AREA DE VIGA	m2	0,113
VV	VOLUMEN DE VIGA	m3	0,0169
DH	DENSIDAD DEL HORMIGÓN	kg/m3	2291,71
MVH	MASA DE CADA VIGA DE HORMIGÓN	kg	38,673
MHV	MASA DE HORMIGÓN PARA VIGAS	kg	38,673
VHV	VOLUMEN DE HORMIGÓN NECESARIO PARA VIGAS	m3	0,0169
DFp	DENSIDAD DE LA FIBRA DE POLIPROPILENO	gr/cm3	0,9
% Fp	% FIBRA DE POLIPROPILENO EN EL HORMIGÓN	%	0,3
VFp	VOLUMEN DE FIBRA DE POLIPROPILENO	m3	3
MFp	MASA DE FIBRA DE POLIPROPILENO EN HORMIGÓN	kg cada m3	2,7
CFpV	CANTIDAD DE FIBRA DE POLIPROPILENO PARA VIGAS	gr	45,56

6.7.3 Determinación del % Óptimo de Fibra de Polipropileno en el Hormigón según su comportamiento a compresión, flexión y tracción.

Con la finalidad de determinar el porcentaje óptimo de fibra de polipropileno que debe adicionarse al hormigón, de las muestras tomadas de cilindros y vigas se analizarán sus propiedades mecánicas en estado fresco y su comportamiento a compresión, tracción y flexión en estado endurecido permitiéndonos identificar como influye la adición de distintas concentraciones de fibra en el hormigón, y a la vez establecer una cantidad óptima de fibra que aporte mayores características.

6.7.3.1 Determinación Propiedades del Hormigón Fresco

Tabla # 61 Propiedades del Hormigón Fresco en Cilindros de Hormigón f’c = 210 kg/cm2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO													
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA													
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL													
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA													
PROPIEDADES DEL HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO EN CILINDROS DE HORMIGÓN f´c = 210 kg/cm2													
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias							NORMA:	NTE INEN 1578 - NTE INEN 1579				
REALIZADO POR:	Egda. María Fernanda Millán							ALTURA DE CILINDRO (M):	0,30				
PROBETA Nº	% DE FIBRA DE POLIPROPILENO	FECHA DE ELABORACIÓN	DIÁMETRO (CM)	MASA DEL RECIPIENTE LLENO DE HORMIGÓN (KG)	MASA DEL RECIPIENTE VACIO (KG)	PESO CILINDRO (KG)	VOLUMEN DEL RECIPIENTE (M3)	TRABAJABILIDAD	CONSISTENCIA (CM)	HOMOGENEIDAD	DENSIDAD (KG/M3)	DENSIDAD MEDIA (KG/M3)	
1	0,0	28/05/2013	15,1	22,1	9,8	12,3	0,005	MEDIA	9,0	BUENA	2289,50	2287,07	
2			15,2	23,9	11,4	12,5	0,005				2296,21		
3			15,0	23,5	11,4	12,1	0,005				2282,40		
4			15,0	23,5	11,4	12,1	0,005				2282,40		
5			15,0	21,9	9,8	12,1	0,005				2282,40		
6			15,1	22,1	9,8	12,3	0,005				2289,50		
7	0,10	28/05/2013	15,0	23,5	11,4	12,1	0,005	MEDIA	9,0	BUENA	2282,40	2284,76	
8			15,0	23,5	11,4	12,1	0,005				2282,40		
9			14,9	23,4	11,4	12	0,005				2294,02		
10			15,2	23,8	11,4	12,4	0,005				2277,84		
11			15,1	22,1	9,8	12,3	0,005				2289,50		
12			15,0	23,5	11,4	12,1	0,005				2282,40		
13	0,15	28/05/2013	15,2	23,8	11,4	12,4	0,005	MEDIA	8,0	BUENA	2277,84	2290,53	
14			15,0	23,5	11,4	12,1	0,005				2282,40		
15			15,1	22,2	9,8	12,4	0,005				2308,11		
16			15,2	23,8	11,3	12,5	0,005				2296,21		
17			15,2	23,9	11,4	12,5	0,005				2296,21		
18			15,0	23,5	11,4	12,1	0,005				2282,40		
19	0,20	28/05/2013	14,9	23,6	11,6	12	0,005	MEDIA	8,0	BUENA	2294,02	2287,86	
20			15,0	23,6	11,5	12,1	0,005				2282,40		
21			15,0	23,5	11,4	12,1	0,005				2282,40		
22			15,1	22,2	9,8	12,4	0,005				2308,11		
23			15,2	23,8	11,4	12,4	0,005				2277,84		
24			15,0	23,5	11,4	12,1	0,005				2282,40		
25	0,25	28/05/2013	15,0	23,5	11,4	12,1	0,005	MEDIA	7,0	BUENA	2282,40	2287,95	
26			14,9	21,9	9,8	12,1	0,005				2313,14		
27			15,0	23,5	11,4	12,1	0,005				2282,40		
28			15,2	23,8	11,4	12,4	0,005				2277,84		
29			15,1	22,1	9,8	12,3	0,005				2289,50		
30			15,0	23,5	11,4	12,1	0,005				2282,40		
31	0,30	28/05/2013	14,9	23,6	11,6	12	0,005	MEDIA	6,0	BUENA	2294,02	2285,94	
32			15,1	22,1	9,8	12,3	0,005				2289,50		
33			15,0	23,5	11,4	12,1	0,005				2282,40		
34			15,2	23,8	11,4	12,4	0,005				2277,84		
35			15,0	23,5	11,4	12,1	0,005				2282,40		
36			15,1	22,1	9,8	12,3	0,005				2289,50		

Tabla # 62 Propiedades del Hormigón Fresco en Cilindros de Hormigón f’c = 240 kg/cm2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA

PROPIEDADES DEL HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO EN CILINDROS DE HORMIGÓN f´c = 240 kg/cm2

ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias	**NORMA:**	NTE INEN 1578 - NTE INEN 1579
REALIZADO POR:	Egda. María Fernanda Millán	**ALTURA DE CILINDRO (M):**	0,30

PROBETA Nº	% DE FIBRA DE POLIPROPILENO	FECHA DE ELABORACIÓN	DIÁMETRO (CM)	MASA DEL RECIPIENTE LLENO DE HORMIGÓN (KG)	MASA DEL RECIPIENTE VACIO (KG)	PESO CILINDRO (KG)	VOLUMEN DEL RECIPIENTE (M3)	TRABAJABILIDAD	CONSISTENCIA (CM)	HOMOGENEIDAD	DENSIDAD (KG/M3)	DENSIDAD MEDIA (KG/M3)
1	0,0	30/05/2013	15,1	22,2	9,8	12,4	0,005	MEDIA	9,0	BUENA	2308,11	2296,50
2			15,2	23,9	11,5	12,4	0,005				2277,84	
3			15,0	23,6	11,4	12,2	0,005				2301,26	
4			15,0	23,6	11,5	12,1	0,005				2282,40	
5			15,0	22,0	9,8	12,2	0,005				2301,26	
6			15,1	22,2	9,8	12,4	0,005				2308,11	
7	0,10	30/05/2013	15,0	23,6	11,4	12,2	0,005	MEDIA	9,0	BUENA	2301,26	2300,36
8			15,0	23,6	11,4	12,2	0,005				2301,26	
9			14,9	23,4	11,4	12	0,005				2294,02	
10			15,2	23,9	11,4	12,5	0,005				2296,21	
11			15,1	22,2	9,8	12,4	0,005				2308,11	
12			15,0	23,6	11,4	12,2	0,005				2301,26	
13	0,15	30/05/2013	15,2	23,9	11,4	12,5	0,005	MEDIA	8,0	BUENA	2296,21	2302,94
14			15,0	23,6	11,4	12,2	0,005				2301,26	
15			15,1	22,2	9,8	12,4	0,005				2308,11	
16			15,2	23,8	11,3	12,5	0,005				2296,21	
17			15,2	24	11,4	12,6	0,005				2314,58	
18			15,0	23,6	11,4	12,2	0,005				2301,26	
19	0,20	30/05/2013	14,9	23,6	11,6	12	0,005	MEDIA	8,0	BUENA	2294,02	2303,50
20			15,0	23,6	11,3	12,3	0,005				2320,13	
21			15,0	23,6	11,4	12,2	0,005				2301,26	
22			15,1	22,2	9,8	12,4	0,005				2308,11	
23			15,2	23,9	11,4	12,5	0,005				2296,21	
24			15,0	23,6	11,4	12,2	0,005				2301,26	
25	0,25	30/05/2013	15,0	23,6	11,2	12,4	0,005	MEDIA	7,0	BUENA	2338,99	2306,64
26			14,9	21,8	9,8	12	0,005				2294,02	
27			15,0	23,6	11,4	12,2	0,005				2301,26	
28			15,2	23,9	11,4	12,5	0,005				2296,21	
29			15,1	22,2	9,8	12,4	0,005				2308,11	
30			15,0	23,6	11,4	12,2	0,005				2301,26	
31	0,30	30/05/2013	14,9	23,6	11,6	12	0,005	MEDIA	6,0	BUENA	2294,02	2304,64
32			15,1	22,2	9,8	12,4	0,005				2308,11	
33			15,0	23,6	11,3	12,3	0,005				2320,13	
34			15,2	23,9	11,4	12,5	0,005				2296,21	
35			15,0	23,6	11,4	12,2	0,005				2301,26	
36			15,1	22,2	9,8	12,4	0,005				2308,11	

Tabla # 63 Propiedades del Hormigón Fresco en Vigas de Hormigón f'c = 210 kg/cm2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO											
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA											
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL											
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA											
PROPIEDADES DEL HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO EN VIGAS DE HORMIGÓN f´c = 210 kg/cm2											
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias				NORMA:	NTE INEN 1578 - NTE INEN 1579		ANCHO DE LA VIGA (M):	0,15		
REALIZADO POR:	Egda. María Fernanda Millán				ALTURA DE VIGA (M):	0,15		LONGITUD DE VIGA (M):	0,75		
PROBETA Nº	% DE FIBRA DE POLIPROPILENO	FECHA DE ELABORACIÓN	MASA DEL RECIPIENTE LLENO DE HORMIGÓN (KG)	MASA DEL RECIPIENTE VACIO (KG)	PESO DE VIGA (KG)	VOLUMEN DEL RECIPIENTE (M3)	TRABAJABILIDAD	CONSISTENCIA (CM)	HOMOGENEIDAD	DENSIDAD (KG/M3)	DENSIDAD MEDIA (KG/M3)
1	0,00	28/05/2013	46,5	7,8	38,7	0,017	MEDIA	9,0	BUENA	2293,33	2297,28
2	0,10		46,6	7,7	38,9	0,017		9,0		2305,19	
3	0,15		46,1	7,5	38,6	0,017		8,0		2287,41	
4	0,20		46,2	7,0	39,2	0,017		8,0		2322,96	
5	0,25		45,3	6,8	38,5	0,017		7,0		2281,48	
6	0,30		45,6	6,9	38,7	0,017		6,0		2293,33	

Tabla # 64 Propiedades del Hormigón Fresco en Vigas de Hormigón f'c = 240 kg/cm2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO											
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA											
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL											
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA											
PROPIEDADES DEL HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO EN VIGAS DE HORMIGÓN f´c = 240 kg/cm2											
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias				NORMA:	NTE INEN 1578 - NTE INEN 1579		ANCHO DE LA VIGA (M):	0,15		
REALIZADO POR:	Egda. María Fernanda Millán				ALTURA DE VIGA (M):	0,15		LONGITUD DE VIGA (M):	0,75		
PROBETA Nº	% DE FIBRA DE POLIPROPILENO	FECHA DE ELABORACIÓN	MASA DEL RECIPIENTE LLENO DE HORMIGÓN (KG)	MASA DEL RECIPIENTE VACIO (KG)	PESO DE VIGA (KG)	VOLUMEN DEL RECIPIENTE (M3)	TRABAJABILIDAD	CONSISTENCIA (CM)	HOMOGENEIDAD	DENSIDAD (KG/M3)	DENSIDAD MEDIA (KG/M3)
1	0,00	29/05/2013	46,0	6,8	39,2	0,017	MEDIA	9,0	BUENA	2322,96	2316,05
2	0,10		46,0	6,7	39,3	0,017		9,0		2328,89	
3	0,15		46,1	7,5	38,6	0,017		8,0		2287,41	
4	0,20		46,3	7,0	39,3	0,017		8,0		2328,89	
5	0,25		46,0	6,8	39,2	0,017		7,0		2322,96	
6	0,30		45,8	6,9	38,9	0,017		6,0		2305,19	

6.7.3.2 Comportamiento del Hormigón a Compresión, Tracción y Flexión.

Tabla # 65 Resistencia a la Compresión del Hormigón f'c = 210 kg/cm2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA

ENSAYO DE COMPRESIÓN DE CILINDROS f´c = 210 kg/cm2

ORIGEN : Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias — **NORMA:** NTE INEN 1573 - ASTM C 39

REALIZADO POR : Egda. María Fernanda Millán — **ALTURA DE CILINDRO (M):** 0,30

PROBETA Nº	% FIBRA DE POLIPROPILENO	FECHA DE ELABORACIÓN	FECHA DE ENSAYO	DIÁMETRO (CM)	ÁREA (CM2)	VOLUMEN (M3)	PESO (KG)	DENSIDAD (KG/M3)	DENSIDAD MEDIA	CARGA		ESFUERZO COMPRESIÓN (KG/CM2)	ESFUERZO MEDIO (KG/CM2)	EDAD DÍAS	LÍMITE INFERIOR (%)	VALOR OBTENIDO (%)	LÍMITE SUPERIOR (%)
										KN	KG						
1				15,1	179,08	0,005	12,3	2289,50		260,96	26599,65	148,54					
3	0,00	28/05/2013	04/06/2013	15,0	176,71	0,005	12,1	2282,40	2284,77	262,74	26781,09	151,55	150,24	7	65,00	71,54	75,00
5				15,0	176,71	0,005	12,1	2282,40		261,14	26618,00	150,63					
7				15,0	176,71	0,005	12,1	2282,40		272,86	27812,62	157,39					
9	0,10	28/05/2013	04/06/2013	14,9	174,37	0,005	12,0	2294,02	2288,64	273,73	27901,30	160,02	157,53	7	65,00	75,01	75,00
11				15,1	179,08	0,005	12,3	2289,50		272,65	27791,21	155,19					
13				15,2	181,46	0,005	12,4	2277,84		285,49	29100,00	160,37					
15	0,15	28/05/2013	04/06/2013	15,1	179,08	0,005	12,4	2308,11	2294,05	286,82	29235,56	163,26	161,29	7	65,00	76,80	75,00
17				15,2	181,46	0,005	12,5	2296,21		285,27	29077,57	160,24					
19				14,9	174,37	0,005	12,0	2294,02		285,64	29115,29	166,98					
21	0,20	28/05/2013	04/06/2013	15,0	176,71	0,005	12,1	2282,40	2284,75	286,11	29163,19	165,03	163,68	7	65,00	77,94	75,00
23				15,2	181,46	0,005	12,4	2277,84		283,12	28858,42	159,04					
25				15,0	176,71	0,005	12,1	2282,40		280,86	28628,06	162,00					
27	0,25	28/05/2013	04/06/2013	15,0	176,71	0,005	12,1	2282,40	2284,77	281,78	28721,84	162,53	161,70	7	65,00	77,00	75,00
29				15,1	179,08	0,005	12,3	2289,50		282,12	28756,49	160,58					
31				14,9	174,37	0,005	12,0	2294,02		275,17	28048,08	160,86					
33	0,30	28/05/2013	04/06/2013	15,0	176,71	0,005	12,1	2282,40	2286,27	276,02	28134,72	159,21	159,61	7	65,00	76,01	75,00
35				15,0	176,71	0,005	12,1	2282,40		275,25	28056,23	158,77					

Tabla # 66 Resistencia a la Compresión del Hormigón f’c = 240 kg/cm2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA

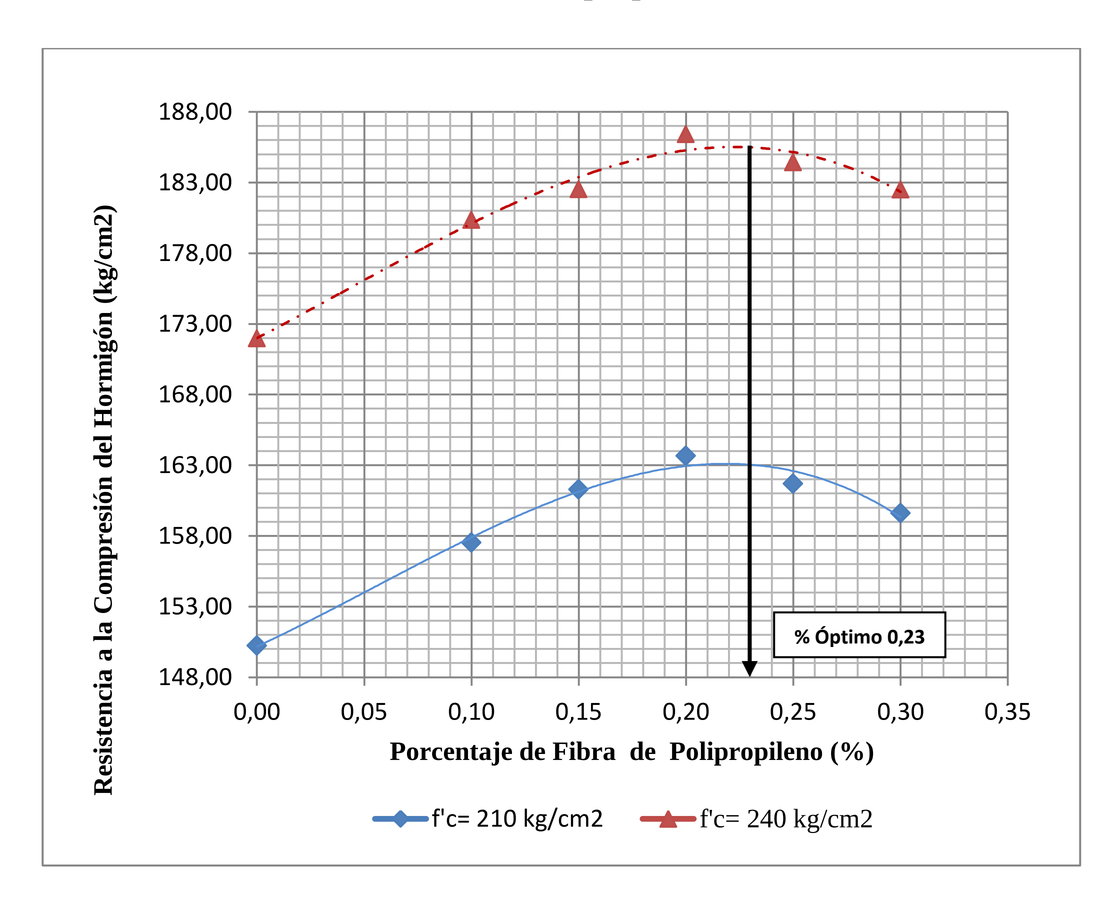
ENSAYO DE COMPRESIÓN DE CILINDROS f´c = 240 kg/cm2

ORIGEN : Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias — NORMA: NTE INEN 1573 - ASTM C 39

REALIZADO POR : Egda. María Fernanda Millán — **ALTURA DE CILINDRO (M):** 0,30

PROBETA Nº	% FIBRA DE POLIPROPILENO	FECHA DE ELABORACIÓN	FECHA DE ENSAYO	DIÁMETRO (CM)	ÁREA (CM2)	VOLUMEN (M3)	PESO (KG)	DENSIDAD (KG/M3)	DENSIDAD MEDIA	CARGA		ESFUERZO COMPRESIÓN (KG/CM2)	ESFUERZO MEDIO (KG/CM2)	EDAD DÍAS	LÍMITE INFERIOR (%)	VALOR OBTENIDO (%)	LÍMITE SUPERIOR (%)
										KN	KG						
1				15,1	179,08	0,005	12,4	2308,11		300,72	30652,39	171,17					
3	0,00	29/05/2013	05/06/2013	15,0	176,71	0,005	12,2	2301,26	2303,55	298,10	30385,33	171,95	171,99	7	65,00	71,66	75,00
5				15,0	176,71	0,005	12,2	2301,26		299,67	30545,36	172,85					
7				15,0	176,71	0,005	12,2	2301,26		313,89	31994,81	181,05					
9	0,10	29/05/2013	05/06/2013	14,9	174,37	0,005	12,0	2294,02	2301,13	312,76	31879,63	182,83	180,36	7	65,00	75,15	75,00
11				15,1	179,08	0,005	12,4	2308,11		311,33	31733,87	177,21					
13				15,2	181,46	0,005	12,5	2296,21		323,20	32943,78	181,55					
15	0,15	29/05/2013	05/06/2013	15,1	179,08	0,005	12,4	2308,11	2306,30	323,14	32937,66	183,93	182,54	7	65,00	76,06	75,00
17				15,2	181,46	0,005	12,6	2314,58		324,26	33051,82	182,15					
19				14,9	174,37	0,005	12,0	2294,02		325,72	33200,64	190,41					
21	0,20	29/05/2013	05/06/2013	15,0	176,71	0,005	12,2	2301,26	2297,17	323,09	32932,56	186,36	186,42	7	65,00	77,67	75,00
23				15,2	181,46	0,005	12,5	2296,21		324,87	33114,00	182,49					
25				15,0	176,71	0,005	12,2	2301,26		322,16	32837,77	185,82					
27	0,25	29/05/2013	05/06/2013	15,0	176,71	0,005	12,2	2301,26	2303,55	320,22	32640,02	184,70	184,45	7	65,00	76,85	75,00
29				15,1	179,08	0,005	12,4	2308,11		321,18	32737,88	182,81					
31				14,9	174,37	0,005	12,0	2294,02		315,54	32162,99	184,46					
33	0,30	29/05/2013	05/06/2013	15,0	176,71	0,005	12,2	2301,26	2298,85	314,83	32090,62	181,60	182,51	7	65,00	76,04	75,00
35				15,0	176,71	0,005	12,2	2301,26		314,61	32068,20	181,47					

Gráfico # 24 Resistencia a la Compresión del Hormigón vs Porcentaje de Fibra de Polipropileno



Interpretación del Gráfico:

Una vez realizados los ensayos de compresión en los cilindros de hormigón de f'c= 210 kg/cm2 y f'c= 240 kg/cm2 con distintas concentraciones de fibra de polipropileno se determinó que el porcentaje óptimo de fibra es aproximadamente 0,23 %, en el cual se presenta un incremento considerable en la resistencia a la compresión del hormigón, además se distingue que a medida que se incrementa el contenido de fibras la resistencia disminuye.

El porcentaje óptimo de fibra de polipropileno determinado en compresión se encuentra dentro de los límites recomendados por la norma ACI-544.2R[63], siendo este valor similar para las distintas dosificaciones presentadas en esta investigación.

[63] *ACI, "Report on Fiber Reinforced Concrete", p. 544.1R-47, literal 4.3.7 "Polypropylene FRC"*

Tabla # 67 Resistencia a la Tracción Indirecta o Tracción por Compresión del Hormigón f’c = 210 kg/cm2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA

ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA DE CILINDROS f´c = 210 kg/cm2

ORIGEN : Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias — **NORMA:** ASTM C 496-96

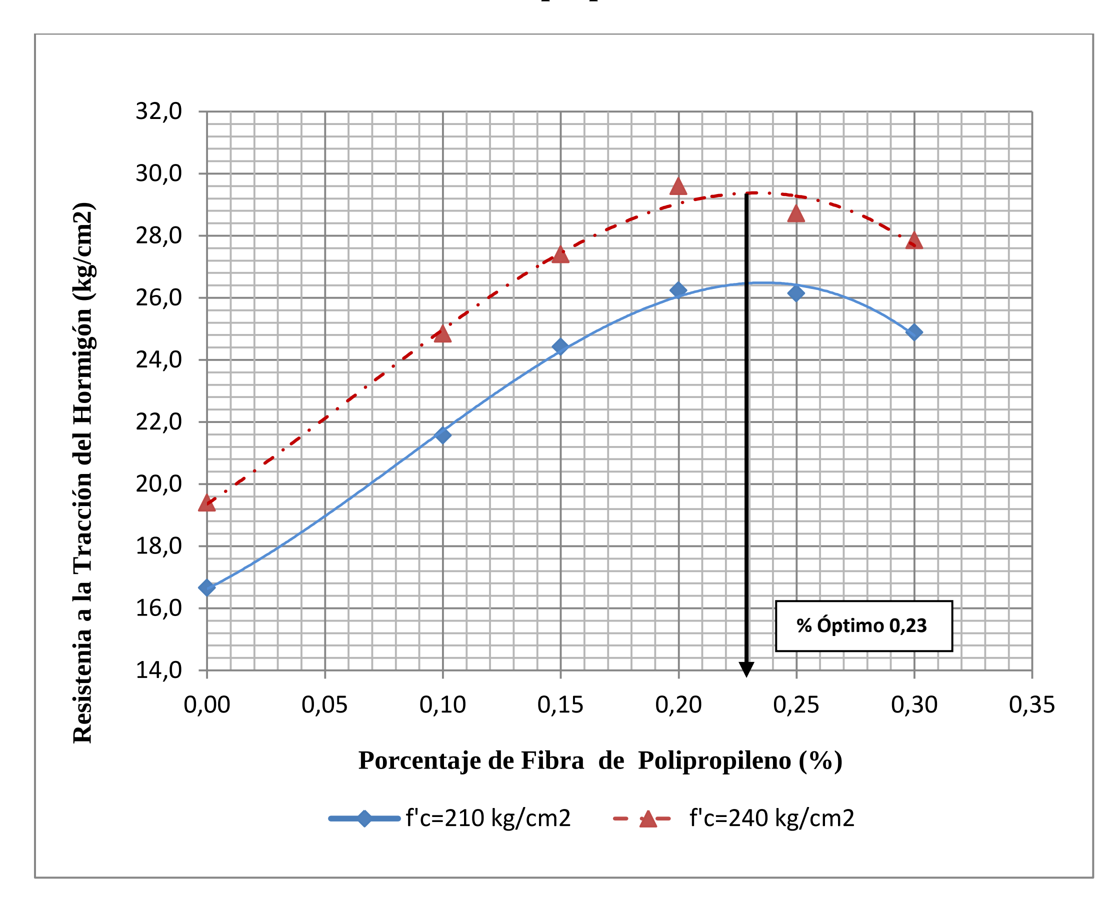
REALIZADO POR : Egda. María Fernanda Millán — **LONGITUD DE CILINDRO (M):** 0,3

PROBETA Nº	% FIBRA DE POLIPROPILENO	FECHA DE ELABORACIÓN	FECHA DE ENSAYO	DIÁMETRO (CM)	ÁREA (CM2)	VOLUMEN (M3)	PESO (KG)	DENSIDAD (KG/M3)	DENSIDAD MEDIA (KG/M3)	CARGA		ESFUERZO TRACCIÓN (KG/CM2)	ESFUERZO MEDIO (KG/CM2)	EDAD DÍAS	RELACIÓN σ COMPRESIÓN /σ TRACCIÓN (%)
										KN	KG				
2				15,2	181,46	0,005	12,5	2296,21		117,27	11953,33	16,69			
4	0,00	28/05/2013	04/06/2013	15,0	176,71	0,005	12,1	2282,40	2289,37	115,13	11735,20	16,60	16,65	7	11,08
6				15,1	179,08	0,005	12,3	2289,50		116,28	11852,42	16,66			
8				15,0	176,71	0,005	12,1	2282,40		149,92	15281,35	21,62			
10	0,10	28/05/2013	04/06/2013	15,2	181,46	0,005	12,4	2277,84	2280,88	148,75	15162,09	21,17	21,56	7	13,69
12				15,0	176,71	0,005	12,1	2282,40		151,86	15479,09	21,90			
14				15,0	176,71	0,005	12,1	2282,40		171,67	17498,32	24,76			
16	0,15	28/05/2013	04/06/2013	15,2	181,46	0,005	12,5	2296,21	2287,00	168,94	17220,05	24,04	24,41	7	15,14
18				15,0	176,71	0,005	12,1	2282,40		169,52	17279,17	24,45			
20				15,0	176,71	0,005	12,1	2282,40		182,61	18613,44	26,33			
22	0,20	28/05/2013	04/06/2013	15,1	179,08	0,005	12,4	2308,11	2290,97	183,45	18699,06	26,28	26,23	7	16,02
24				15,0	176,71	0,005	12,1	2282,40		180,82	18430,98	26,07			
26				14,9	174,37	0,005	12,1	2313,14		181,22	18471,75	26,31			
28	0,25	28/05/2013	04/06/2013	15,2	181,46	0,005	12,4	2277,84	2291,13	181,49	18499,28	25,83	26,14	7	16,17
30				15,0	176,71	0,005	12,1	2282,40		182,31	18582,86	26,29			
32				15,1	179,08	0,005	12,3	2289,50		175,21	17859,16	25,10			
34	0,30	28/05/2013	04/06/2013	15,2	181,46	0,005	12,4	2277,84	2285,61	174,32	17768,44	24,81	24,88	7	15,59
36				15,1	179,08	0,005	12,3	2289,50		172,70	17603,31	24,74			

Tabla # 68 Resistencia a la Tracción Indirecta o Tracción por Compresión del Hormigón f'c = 240 kg/cm2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO																
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA																
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL																
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA																
ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA DE CILINDROS f´c = 240 kg/cm2																
ORIGEN :	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias										NORMA:	ASTM C 496-96				
REALIZADO POR :	Egda. María Fernanda Millán										LONGITUD DE CILINDRO (M):	0,3				
PROBETA Nº	% FIBRA DE POLIPROPILENO	FECHA DE ELABORACIÓN	FECHA DE ENSAYO	DIÁMETRO (CM)	ÁREA (CM2)	VOLUMEN (M3)	PESO (KG)	DENSIDAD (KG/M3)	DENSIDAD MEDIA (KG/M3)	CARGA		ESFUERZO TRACCIÓN (KG/CM2)	ESFUERZO MEDIO (KG/CM2)	EDAD DÍAS	RELACIÓN σ COMPRESIÓN /σ TRACCIÓN (%)	
										KN	KG					
2				15,2	181,46	0,005	12,4	2277,84		135,11	13771,76	19,23				
4	0,00	29/05/2013	05/06/2013	15,0	176,71	0,005	12,1	2282,40	2289,45	136,65	13928,73	19,71	19,39	7	11,28	
6				15,1	179,08	0,005	12,4	2308,11		134,34	13693,28	19,24				
8				15,0	176,71	0,005	12,2	2301,26		171,78	17509,54	24,77				
10	0,10	29/05/2013	05/06/2013	15,2	181,46	0,005	12,5	2296,21	2299,58	173,05	17638,99	24,63	24,84	7	13,77	
12				15,0	176,71	0,005	12,2	2301,26		174,12	17748,05	25,11				
14				15,0	176,71	0,005	12,2	2301,26		188,43	19206,67	27,17				
16	0,15	29/05/2013	05/06/2013	15,2	181,46	0,005	12,5	2296,21	2299,58	192,51	19622,54	27,39	27,39	7	15,01	
18				15,0	176,71	0,005	12,2	2301,26		191,45	19514,50	27,61				
20				15,0	176,71	0,005	12,3	2320,13		206,22	21020,00	29,74				
22	0,20	29/05/2013	05/06/2013	15,1	179,08	0,005	12,4	2308,11	2309,83	204,91	20886,48	29,35	29,59	7	15,87	
24				15,0	176,71	0,005	12,2	2301,26		205,87	20984,33	29,69				
26				14,9	174,37	0,005	12,0	2294,02		200,21	20407,41	29,06				
28	0,25	29/05/2013	05/06/2013	15,2	181,46	0,005	12,5	2296,21	2297,17	199,84	20369,69	28,44	28,72	7	15,57	
30				15,0	176,71	0,005	12,2	2301,26		198,71	20254,51	28,65				
32				15,1	179,08	0,005	12,4	2308,11		195,38	19915,08	27,99				
34	0,30	29/05/2013	05/06/2013	15,2	181,46	0,005	12,5	2296,21	2304,14	195,94	19972,16	27,88	27,85	7	15,26	
36				15,1	179,08	0,005	12,4	2308,11		193,21	19693,90	27,68				

Gráfico # 25 Resistencia a la Tracción del Hormigón vs Porcentaje de Fibra de Polipropileno



Interpretación del Gráfico:

Concluidos los ensayos de tracción indirecta en los cilindros de hormigón de f’c= 210 kg/cm2 y f’c= 240 kg/cm2 con distintas concentraciones de fibra de polipropileno se determinó que el porcentaje óptimo de fibra es aproximadamente 0,23 %, en donde se presenta un incremento considerable en la resistencia a tracción del hormigón y a partir de este punto empieza a decaer según aumenta la concentración de fibra.

El porcentaje óptimo de fibra de polipropileno en tracción indirecta determinado se encuentra dentro de los límites recomendados por la norma ACI-544.2R[64], siendo este valor similar para las distintas dosificaciones presentadas en esta investigación.

[64] *ACI, “Report on Fiber Reinforced Concrete”, p. 544.1R-47, literal 4.3.7 “Polypropylene FRC”*

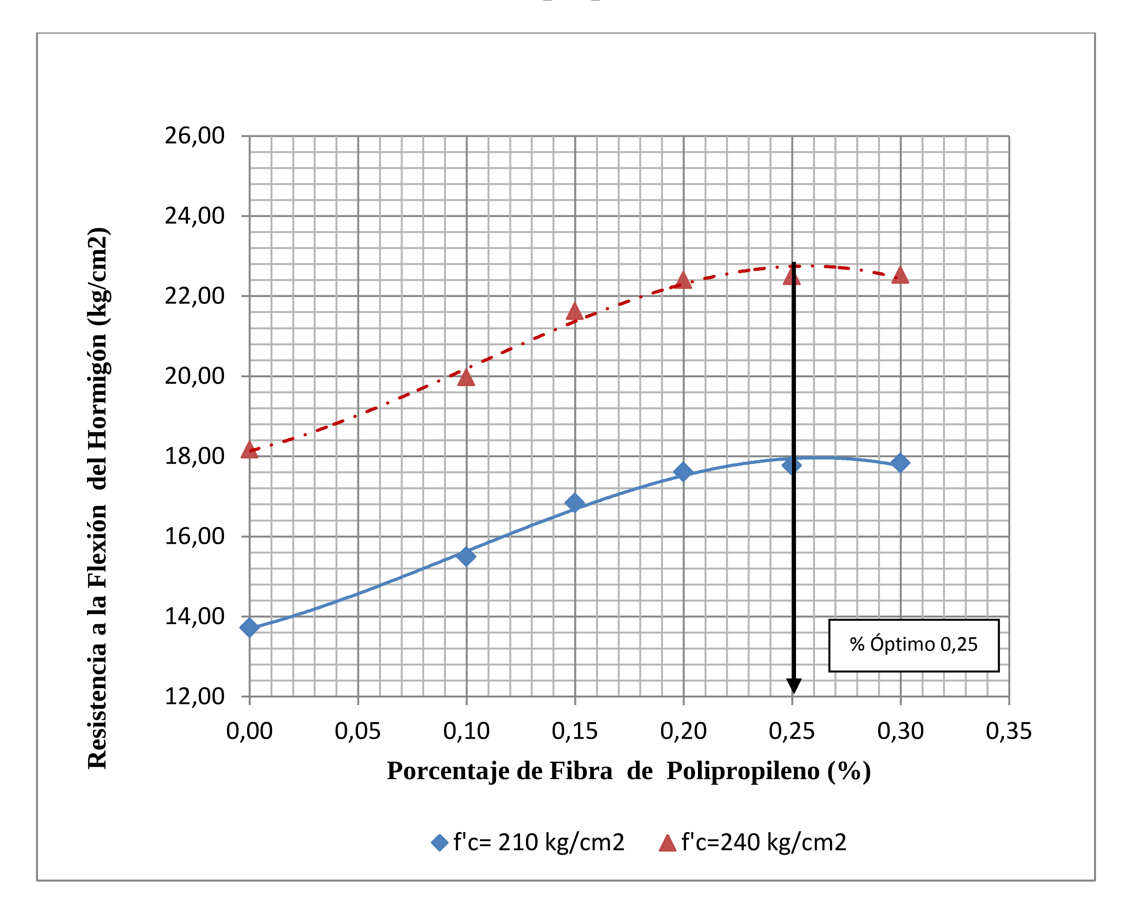
Tabla # 69 Resistencia a la Flexión del Hormigón f'c = 210 kg/cm2 con una carga puntual en el centro de la luz

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO												
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA												
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL												
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA												
ENSAYO DE FLEXIÓN EN VIGAS DE HORMIGÓN CON UNA CARGA PUNTUAL EN EL CENTRO DE LA LUZ f´c = 210 kg/cm2												
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias									NORMA:	ASTM C-293	
REALIZADO POR:	Egda. María Fernanda Millán					DIMENSIONES (CM):		15X15X76		**LONGITUD DE MEDIDA (CM):**	70	
PROBETA Nº	**% DE FIBRA DE POLIPROPILENO**	**FECHA DE ELABORACIÓN**	**FECHA DE ENSAYO**	**ÁREA (CM2)**	**VOLUMEN (M3)**	**PESO DE VIGA (KG)**	**DENSIDAD (KG/M3)**	**CARGA (KG)**	**MÓDULO DE ROTURA (KG/CM2)**	**EDAD DÍAS**	**RELACIÓN σ COMPRESIÓN /σ FLEXION (%)**	
1	0,00	28/05/2013	04/06/2013	1125,0	0,017	38,7	2293,33	441	13,72	7	9,13	
2	0,10			1125,0	0,017	38,9	2305,19	498	15,49		9,84	
3	0,15			1125,0	0,017	38,6	2287,41	541	16,83		10,44	
4	0,20			1125,0	0,017	39,2	2322,96	566	17,61		10,76	
5	0,25			1125,0	0,017	38,5	2281,48	571	17,76		10,99	
6	0,30			1125,0	0,017	38,7	2293,33	573	17,83		11,17	

Tabla # 70 Resistencia a la Flexión del Hormigón f'c = 240 kg/cm2 con una carga puntual en el centro de la luz

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO												
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA												
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL												
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA												
ENSAYO DE FLEXIÓN EN VIGAS DE HORMIGÓN CON UNA CARGA PUNTUAL EN EL CENTRO DE LA LUZ f´c = 240 kg/cm2												
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias									NORMA:	ASTM C-293	
REALIZADO POR:	Egda. María Fernanda Millán					DIMENSIONES (CM):		15X15X76		**LONGITUD DE MEDIDA (CM):**	70	
PROBETA Nº	**% DE FIBRA DE POLIPROPILENO**	**FECHA DE ELABORACIÓN**	**FECHA DE ENSAYO**	**ÁREA (CM2)**	**VOLUMEN (M3)**	**PESO DE VIGA (KG)**	**DENSIDAD (KG/M3)**	**CARGA (KG)**	**MÓDULO DE ROTURA (KG/CM2)**	**EDAD DÍAS**	**RELACIÓN σ COMPRESIÓN /σ FLEXION (%)**	
1	0,00	29/05/2013	05/06/2013	1125,0	0,017	39,2	2322,96	584	18,17	7	10,56	
2	0,10			1125,0	0,017	39,3	2328,89	642	19,97		11,07	
3	0,15			1125,0	0,017	38,6	2287,41	695	21,62		11,85	
4	0,20			1125,0	0,017	39,3	2328,89	720	22,40		12,02	
5	0,25			1125,0	0,017	39,2	2322,96	723	22,49		12,20	
6	0,30			1125,0	0,017	38,9	2305,19	724	22,52		12,34	

Gráfico # 26 Resistencia a la Flexión del Hormigón vs Porcentaje de Fibra de Polipropileno



Interpretación del Gráfico:

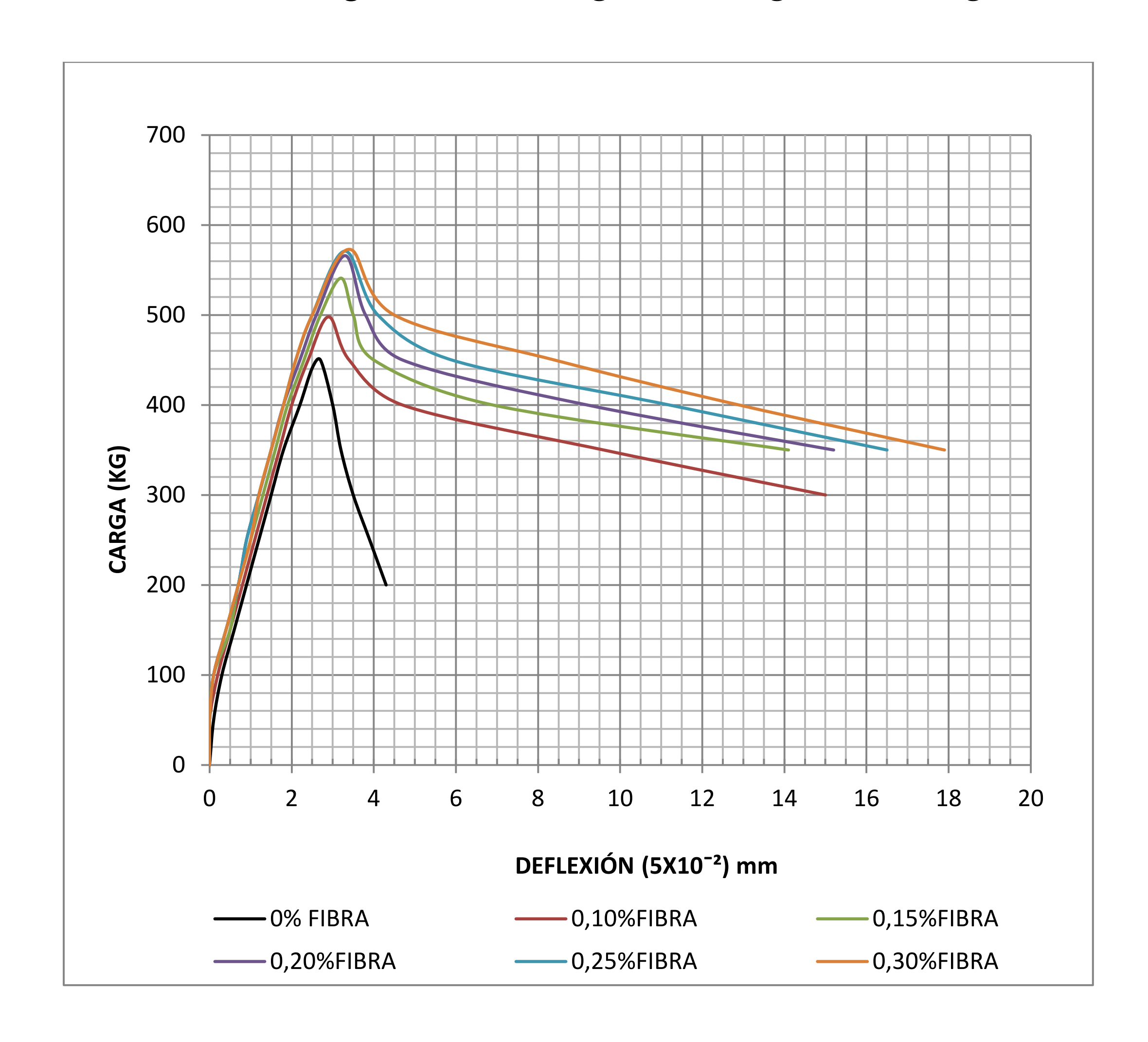
Concluidos los ensayos de flexión en las vigas de hormigón de f'c= 210 kg/cm2 y f'c= 240 kg/cm2 con distintas concentraciones de fibra de polipropileno se determinó que el porcentaje óptimo de fibra es aproximadamente 0,25 %, siendo ligeramente superior que en los ensayos de compresión y tracción antes realizados, además se puede observar que a medida que incrementa la concentración de fibra aumenta la resistencia a la flexión del hormigón debido a la contribución de las fibras para coser la matriz del hormigón aunque éste se haya fisurado. El % óptimo de fibra de polipropileno en flexión determinado se encuentra dentro de los límites recomendados por la norma ACI-544.2R[65], siendo este valor similar para las distintas dosificaciones presentadas en esta investigación.

[65] *ACI, "Report on Fiber Reinforced Concrete", p. 544.1R-47, literal 4.3.7 "Polypropylene FRC"*

Tabla # 71 Deflexiones en Vigas de Hormigón f'c = 210 kg/cm2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO														
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA														
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL														
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA														
DEFLEXIÓN EN VIGAS DE HORMIGÓN f´c = 210 kg/cm2														
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias								DIMENSIONES (CM):		15X15X75			
REALIZADO POR:	Egda. María Fernanda Millán								LONGITUD DE MEDIDA DE VIGA (M)		0,70			
FECHA DE ELABORACIÓN	FECHA DE ENSAYO	EDAD DÍAS	0,0% FIBRA		0,10% FIBRA		0,15% FIBRA		0,20% FIBRA		0,25% FIBRA		0,30% FIBRA	
			CARGA (KG)	DEFLEXIÓN $5X10^{-2}$ (mm)	CARGA (KG)	DEFLEXIÓN $5X10^{-2}$ (mm)	CARGA (KG)	DEFLEXIÓN $5X10^{-2}$ (mm)	CARGA (KG)	DEFLEXIÓN $5X10^{-2}$ (mm)	CARGA (KG)	DEFLEXIÓN $5X10^{-2}$ (mm)	CARGA (KG)	DEFLEXIÓN $5X10^{-2}$ (mm)
			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			50	0,1	50	0	50	0	50	0	50	0	50	0
			100	0,3	100	0,2	100	0,1	100	0,1	100	0,1	100	0,1
			150	0,6	150	0,5	150	0,5	150	0,4	150	0,4	150	0,4
			200	0,9	200	0,8	200	0,7	200	0,7	200	0,7	200	0,7
			250	1,2	250	1,1	250	1,0	250	0,9	250	0,9	250	1,0
			300	1,5	300	1,4	300	1,3	300	1,2	300	1,2	300	1,2
			350	1,8	350	1,7	350	1,6	350	1,5	350	1,5	350	1,5
28/05/2013	04/06/2013	7	400	2,2	400	2	400	1,9	400	1,8	400	1,8	400	1,8
			441	2,5	450	2,4	450	2,3	450	2,2	450	2,1	450	2,1
			450	2,7	498	2,9	500	2,7	500	2,6	500	2,5	500	2,5
			400	3,0	450	3,4	541	3,2	566	3,3	571	3,3	573	3,4
			350	3,2	400	4,7	500	3,5	500	3,8	500	4,1	500	4,5
			300	3,5	350	9,6	450	4,0	450	4,7	450	5,9	450	8,4
			250	3,9	300	15,0	400	6,9	400	9,2	400	11,2	400	12,9
			200	4,3	250		350	14,1	350	15,2	350	16,5	350	17,9

Gráfico # 27   Carga vs. Deflexión Vigas de Hormigón f'c = 210 kg/cm2



Interpretación del Gráfico:

De las curvas Carga vs. Deflexión obtenidas se puede apreciar claramente la influencia de las fibras durante el comportamiento post pico de la probeta, ya que al producirse la primera fisura la carga no cae bruscamente y el hormigón no se rompe por el contrario sigue absorbiendo energía hasta llegar a la rotura con una deformación muy grande permitiendo una falla mucho más dúctil. A medida que aumenta la concentración de fibras crece esta capacidad de absorción de energía.

Tabla # 72 Deflexión en Vigas de Hormigón f’c = 240 kg/cm2

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

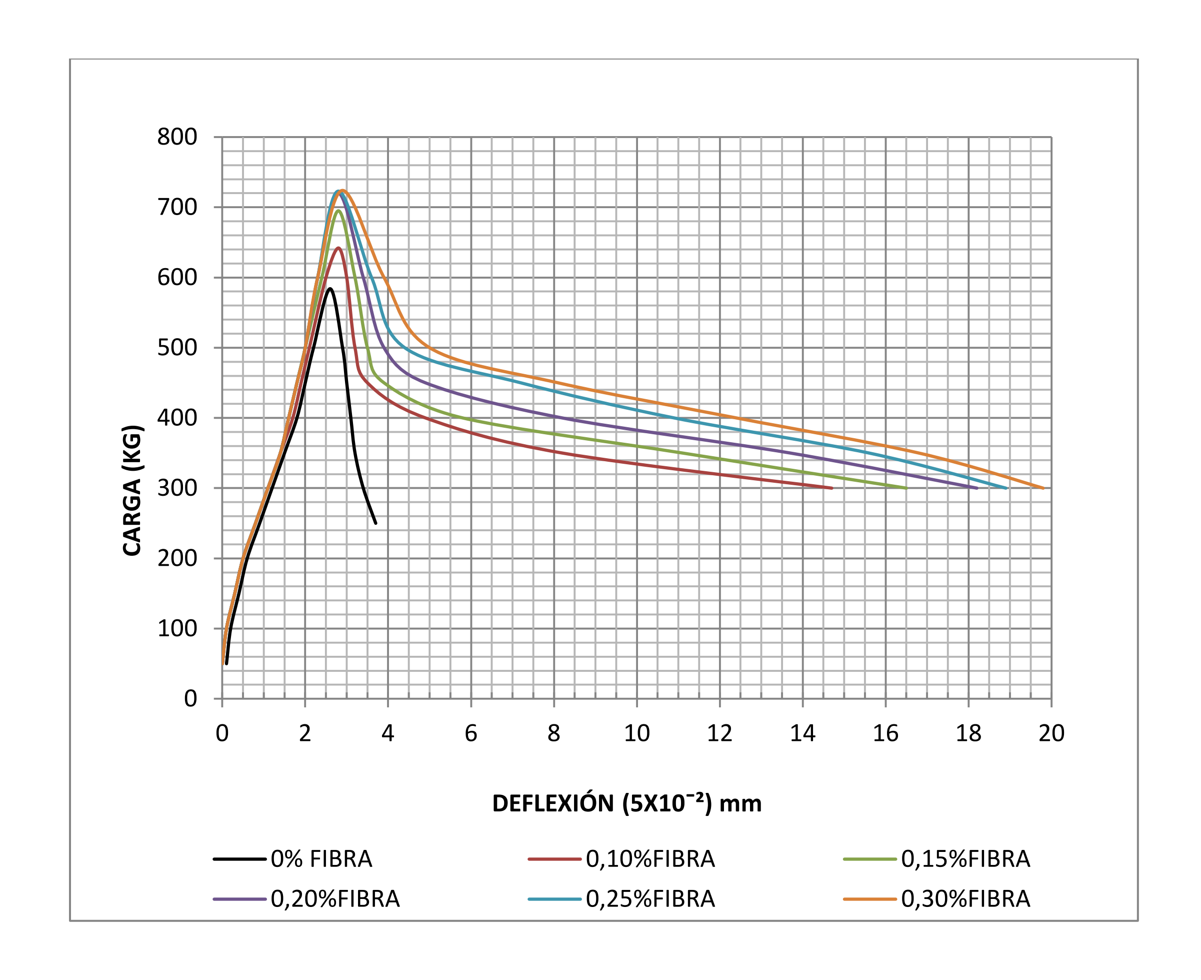
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA

DEFLEXIÓN EN VIGAS DE HORMIGÓN f´c = 240 kg/cm2

ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias	DIMENSIONES (CM):	15X15X75
REALIZADO POR:	Egda. María Fernanda Millán	LONGITUD DE MEDIDA DE VIGA (M)	0,70

FECHA DE ELABORACIÓN	FECHA DE ENSAYO	EDAD DÍAS	0,0% FIBRA		0,10% FIBRA		0,15% FIBRA		0,20% FIBRA		0,25% FIBRA		0,30% FIBRA	
			CARGA (KG)	DEFLEXIÓN $5X10^{-2}$ (mm)	CARGA (KG)	DEFLEXIÓN $5X10^{-2}$ (mm)	CARGA (KG)	DEFLEXIÓN $5X10^{-2}$ (mm)	CARGA (KG)	DEFLEXIÓN $5X10^{-2}$ (mm)	CARGA (KG)	DEFLEXIÓN $5X10^{-2}$ (mm)	CARGA (KG)	DEFLEXIÓN $5X10^{-2}$ (mm)
29/05/2013	05/06/2013	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			50	0,1	50	0	50	0	50	0	50	0	50	0
			100	0,2	100	0,1	100	0,1	100	0,1	100	0,1	100	0,1
			150	0,4	150	0,3	150	0,3	150	0,3	150	0,3	150	0,3
			200	0,6	200	0,5	200	0,5	200	0,5	200	0,5	200	0,5
			250	0,9	250	0,8	250	0,8	250	0,8	250	0,8	250	0,8
			300	1,2	300	1,1	300	1,1	300	1,1	300	1,1	300	1,1
			350	1,5	350	1,4	350	1,4	350	1,4	350	1,4	350	1,4
			400	1,8	400	1,7	400	1,6	400	1,6	400	1,6	400	1,6
			450	2,0	450	1,9	450	1,8	450	1,8	450	1,8	450	1,8
			500	2,2	500	2,1	500	2	500	2,0	500	2,0	500	2,0
			584	2,6	600	2,5	600	2,4	600	2,3	600	2,3	600	2,3
			500	2,9	642	2,8	695	2,8	720	2,8	723	2,8	724	2,9
			450	3,0	600	3,0	600	3,2	600	3,4	600	3,6	600	3,9
			400	3,1	500	3,2	500	3,5	500	3,9	500	4,4	500	5,0
			350	3,2	450	3,5	450	3,9	450	4,9	450	7,2	450	8,1
			300	3,4	400	4,9	400	5,8	400	8,2	400	10,9	400	12,4
			250	3,7	350	8,2	350	11,1	350	13,7	350	15,6	350	16,8
			200		300	14,7	300	16,5	300	18,2	300	18,9	300	19,8

Gráfico # 28 Carga vs. Deflexión Vigas de Hormigón f'c = 240 kg/cm2



Interpretación del Gráfico:

De las curvas Carga vs. Deflexión obtenidas se puede apreciar claramente la influencia de las fibras durante el comportamiento post pico de la probeta, ya que al producirse la primera fisura la carga no cae bruscamente y el hormigón no se rompe por el contrario sigue absorbiendo energía hasta llegar a la rotura con una deformación muy grande permitiendo una falla mucho más dúctil. A medida que aumenta la concentración de fibras crece esta capacidad de absorción de energía.

6.7.4 Comparación del Hormigón Reforzado con Fibras de Polipropileno (HRFp) con el % Óptimo y el Hormigón Simple (Sin Fibras) según su comportamiento a compresión, tracción y flexión.

6.7.4.1 Propiedades en Estado Fresco del HRFp con el % Óptimo y el Hormigón Simple (Sin Fibras)

Tabla # 73 Propiedades en Estado Fresco del HRFp con el % Óptimo y el Hormigón Simple (Sin Fibras) en Cilindros

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO												
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA												
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL												
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA												
PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO CON EL % ÓPTIMO Y EL HORMIGÓN SIMPLE (SIN FIBRAS) EN CILINDROS												
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias							NORMA:	NTE INEN 1578 - NTE INEN 1579			
REALIZADO POR:	Egda. María Fernanda Millán							ALTURA DE CILINDRO (M):	0,30			
PROBETA Nº	IDENTIFICACIÓN	FECHA DE ELABORACIÓN	DIÁMETRO (CM)	MASA DEL RECIPIENTE LLENO DE HORMIGÓN (KG)	MASA DEL RECIPIENTE VACIO (KG)	PESO CILINDRO (KG)	VOLUMEN DEL RECIPIENTE (M3)	TRABAJABILIDAD	CONSISTENCIA (CM)	HOMOGENEIDAD	DENSIDAD (KG/M3)	DENSIDAD MEDIA (KG/M3)
1	HORMIGÓN SIMPLE (f'c=210kg/cm2)	13/06/2013	15,1	23,8	11,6	12,2	0,005	MEDIA	9,0	BUENA	2270,88	2281,07
2			15,2	23,4	11,2	12,2	0,005				2241,10	
3			15,0	23,4	11,2	12,2	0,005				2301,26	
4			15,0	23,4	11,2	12,2	0,005				2301,26	
5			15,0	21,9	9,8	12,1	0,005				2282,40	
6			15,1	23,5	11,2	12,3	0,005				2289,50	
7	HORMIGÓN CON (0,23%) Fp (f'c=210kg/cm2)	13/06/2013	15,0	22,0	9,8	12,2	0,005	MEDIA	8,0	BUENA	2301,26	2294,44
8			15,0	23,8	11,6	12,2	0,005				2301,26	
9			14,9	23,8	11,6	12,2	0,005				2332,26	
10			15,2	23,6	11,4	12,2	0,005				2241,10	
11			15,1	22,1	9,8	12,3	0,005				2289,50	
12			15,0	23,6	11,4	12,2	0,005				2301,26	
13	HORMIGÓN SIMPLE (f'c=240kg/cm2)	14/06/2013	15,0	23,8	11,5	12,3	0,005	MEDIA	9,0	BUENA	2320,13	2295,46
14			15,1	23,7	11,5	12,2	0,005				2270,88	
15			15,0	22,1	9,8	12,3	0,005				2320,13	
16			15,1	22,0	9,8	12,2	0,005				2270,88	
17			15,0	23,4	11,2	12,2	0,005				2301,26	
18			15,1	22,1	9,8	12,3	0,005				2289,50	
19	HORMIGÓN CON (0,23%) Fp (f'c=240kg/cm2)	14/06/2013	15,0	23,5	11,4	12,1	0,005	MEDIA	8,0	BUENA	2282,40	2303,83
20			15,1	23,7	11,5	12,2	0,005				2270,88	
21			15,0	23,7	11,4	12,3	0,005				2320,13	
22			15,2	23,6	11,2	12,4	0,005				2277,84	
23			14,9	22,2	9,8	12,4	0,005				2370,49	
24			15,0	23,6	11,4	12,2	0,005				2301,26	

Tabla # 74 Propiedades en Estado Fresco del HRFp con el % Óptimo y el Hormigón Simple (Sin Fibras) en Vigas

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO										
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA										
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL										
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA										
COMPARACIÓN ENTRE EL HORMIGÓN REFORZADO CON EL % ÓPTIMO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO Y EL HORMIGÓN SIMPLE (SIN FIBRAS) EN VIGAS										
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias				**NORMA:**	NTE INEN 1578 - NTE INEN 1579		**ANCHO DE LA VIGA (M):**		0,15
REALIZADO POR:	Egda. María Fernanda Millán				**ALTURA DE VIGA (M):**	0,15		**LONGITUD DE VIGA (M):**		0,75
PROBETA Nº	**IDENTIFICACIÓN**	**FECHA DE ELABORACIÓN**	**MASA DEL RECIPIENTE LLENO DE HORMIGÓN (KG)**	**MASA DEL RECIPIENTE VACIO (KG)**	**PESO DE VIGA (KG)**	**VOLUMEN DEL RECIPIENTE (M3)**	**TRABAJABILIDAD**	**CONSISTENCIA (CM)**	**HOMOGENEIDAD**	**DENSIDAD (KG/M3)**
1	HORMIGÓN SIMPLE (f'c=210kg/cm2)	13/06/2013	46,0	7,2	38,8	0,017	MEDIA	9,0	BUENA	2299,26
2	HORMIGÓN CON (0,25%) Fp (f'c=210kg/cm2)	13/06/2013	46,4	7,4	39,0	0,017	MEDIA	8,0	BUENA	2311,11
3	HORMIGÓN SIMPLE (f'c=240kg/cm2)	14/06/2013	46,6	7,8	38,8	0,017	MEDIA	9,0	BUENA	2299,26
4	HORMIGÓN CON (0,25%) Fp (f'c=240kg/cm2)	14/06/2013	46,0	7,2	38,8	0,017	MEDIA	8,0	BUENA	2299,26

6.7.4.2 Comportamiento del HRFp con el % Óptimo y el Hormigón Simple (Sin Fibras)

Tabla # 75 Resistencia a la Compresión en cilindros de Hormigón Reforzados con (0,23 %) de Fibra de Polipropileno y el Hormigón Simple (Sin fibras)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA

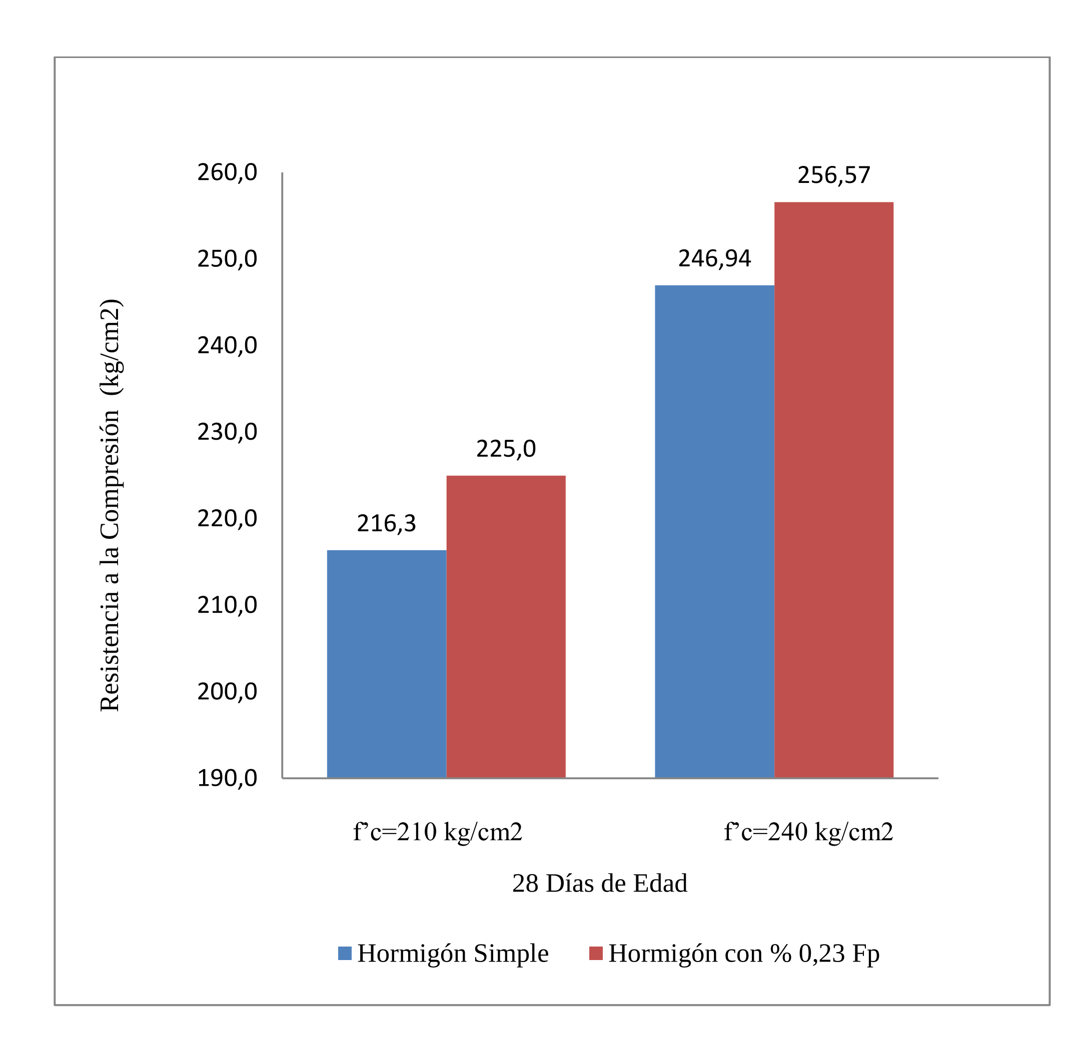
ENSAYO DE COMPRESIÓN EN CILINDROS DE HORMIGÓN REFORZADOS CON (0,23 %) DE FIBRA DE POLIPROPILENO Y EL HORMIGÓN SIMPLE (SIN FIBRAS)

ORIGEN : Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias — NORMA: NTE INEN 1573 - ASTM C 39

REALIZADO POR : Egda. María Fernanda Millán — **ALTURA DE CILINDRO (M):** 0,30

PROBETA Nº	IDENTIFICACIÓN	FECHA DE ELABORACIÓN	FECHA DE ENSAYO	DIÁMETRO (CM)	ÁREA (CM2)	VOLUMEN (M3)	PESO (KG)	DENSIDAD (KG/M3)	DENSIDAD MEDIA	CARGA		ESFUERZO COMPRESIÓN (KG/CM2)	ESFUERZO MEDIO (KG/CM2)	EDAD DÍAS	LÍMITE INFERIOR (%)	VALOR OBTENIDO (%)	LÍMITE SUPERIOR (%)
										KN	KG						
1	HORMIGÓN SIMPLE (f'c=210kg/cm2)	13/06/2013	11/07/2013	15,1	179,08	0,005	12,2	2270,88	2284,85	375,31	38255,35	213,62	216,33	28	95,00	103,01	105,00
3				15,0	176,71	0,005	12,2	2301,26		376,33	38359,32	217,07					
5				15,0	176,71	0,005	12,1	2282,40		378,45	38575,41	218,29					
7	HORMIGÓN CON (0,23%) Fp (f'c=210kg/cm2)	13/06/2013	11/07/2013	15,0	176,71	0,005	12,2	2301,26	2307,67	391,32	39887,25	225,72	224,95	28	95,00	107,12	105,00
9				14,9	174,37	0,005	12,2	2332,26		389,98	39750,66	227,97					
11				15,1	179,08	0,005	12,3	2289,50		388,56	39605,92	221,16					
13	HORMIGÓN SIMPLE (f'c=240kg/cm2)	14/06/2013	12/07/2013	15,0	176,71	0,005	12,3	2320,13	2313,84	427,14	43538,38	246,38	246,94	28	95,00	102,89	105,00
15				15,0	176,71	0,005	12,3	2320,13		428,95	43722,87	247,42					
17				15,0	176,71	0,005	12,2	2301,26		428,27	43653,56	247,03					
19	HORMIGÓN CON (0,23%) Fp (f'c=240kg/cm2)	14/06/2013	12/07/2013	15,0	176,71	0,005	12,1	2282,40	2324,34	443,78	45234,50	255,97	256,57	28	95,00	106,91	105,00
21				15,0	176,71	0,005	12,3	2320,13		441,03	44954,19	254,39					
23				14,9	174,37	0,005	12,4	2370,49		443,67	45223,28	259,36					

Gráfico # 29 Resistencia a la Compresión en cilindros de Hormigón Reforzados con (0,23 %) de Fibra de Polipropileno y el Hormigón Simple (Sin fibras)



Interpretación del Gráfico:

De los ensayos de compresión realizados en cilindros de f'c=210 kg/cm2 y f'c=240 kg/cm2, en el hormigón reforzado con el 0,23% de fibra de polipropileno se puede apreciar un incremento considerable en la resistencia a la compresión de aproximadamente el 5% en relación al hormigón simple (Sin Fibra), además al momento de realizar los ensayos la falla de los cilindros reforzados con fibra no fue explosiva a diferencia del hormigón simple.

Tabla # 76 Resistencia a la Tracción Indirecta en cilindros de Hormigón Reforzados con (0,23 %) de Fibra de Polipropileno y el Hormigón Simple (Sin fibras)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA

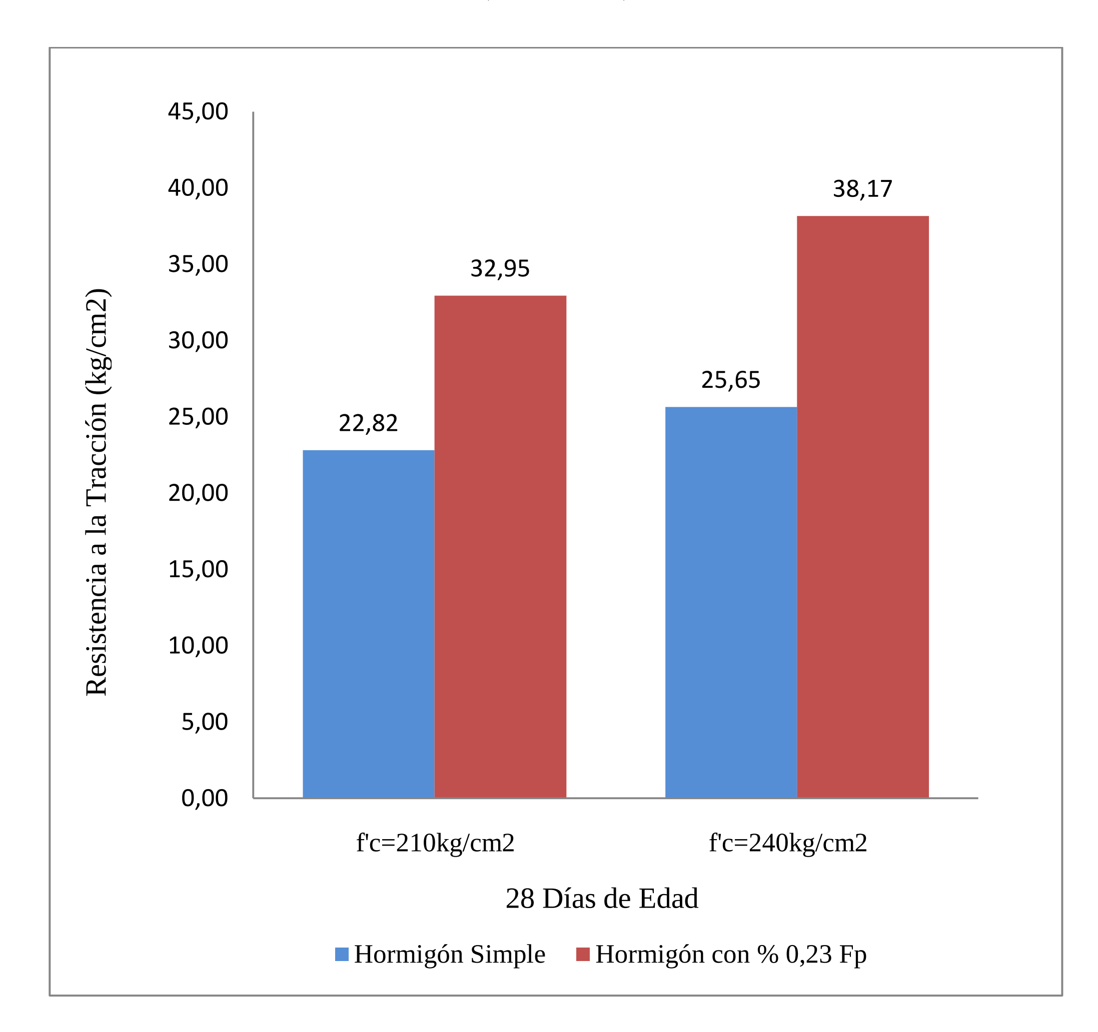
ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA EN CILINDROS DE HORMIGÓN REFORZADOS CON (0,23 %) DE FIBRA DE POLIPROPILENO Y EL HORMIGÓN SIMPLE (SIN FIBRAS)

ORIGEN : Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias — **NORMA:** ASTM C 496-96

REALIZADO POR : Egda. María Fernanda Millán — **LONGITUD DE CILINDRO (M):** 0,3

PROBETA Nº	IDENTIFICACIÓN	FECHA DE ELABORACIÓN	FECHA DE ENSAYO	DIÁMETRO (CM)	ÁREA (CM2)	VOLUMEN (M3)	PESO (KG)	DENSIDAD (KG/M3)	DENSIDAD MEDIA (KG/M3)	CARGA		ESFUERZO TRACCIÓN (KG/CM2)	ESFUERZO MEDIO (KG/CM2)	EDAD DÍAS	RELACIÓN σ COMPRESIÓN /σ TRACCIÓN (%)
										KN	KG				
2	HORMIGÓN SIMPLE (f'c=210kg/cm2)	13/06/2013	11/07/2013	15,1	179,08	0,005	12,2	2270,88	2280,93	159,23	16230,31	22,81	22,82	28	10,55
4				15,0	176,71	0,005	12,1	2282,40		158,12	16117,17	22,80			
6				15,1	179,08	0,005	12,3	2289,50		159,47	16254,78	22,84			
8	HORMIGÓN CON (0,23%) Fp (f'c=210kg/cm2)	13/06/2013	11/07/2013	15,0	176,71	0,005	12,2	2301,26	2284,85	230,87	23532,58	33,29	32,95	28	14,65
10				15,1	179,08	0,005	12,2	2270,88		229,45	23387,84	32,87			
12				15,0	176,71	0,005	12,1	2282,40		226,73	23110,59	32,69			
14	HORMIGÓN SIMPLE (f'c=240kg/cm2)	14/06/2013	12/07/2013	15,0	176,71	0,005	12,1	2282,40	2291,05	177,89	18132,33	25,65	25,65	28	10,39
16				15,0	176,71	0,005	12,2	2301,26		177,34	18076,27	25,57			
18				15,1	179,08	0,005	12,3	2289,50		179,65	18311,72	25,73			
20	HORMIGÓN CON (0,23%) Fp (f'c=240kg/cm2)	14/06/2013	12/07/2013	15,1	179,08	0,005	12,3	2289,50	2293,42	267,33	27248,95	38,29	38,17	28	14,88
22				15,1	179,08	0,005	12,3	2289,50		265,41	27053,24	38,02			
24				15,0	176,71	0,005	12,2	2301,26		264,92	27003,30	38,20			

Gráfico # 30 Resistencia a la Tracción Indirecta en cilindros de Hormigón Reforzados con (0,23 %) de Fibra de Polipropileno y el Hormigón Simple (Sin fibras)



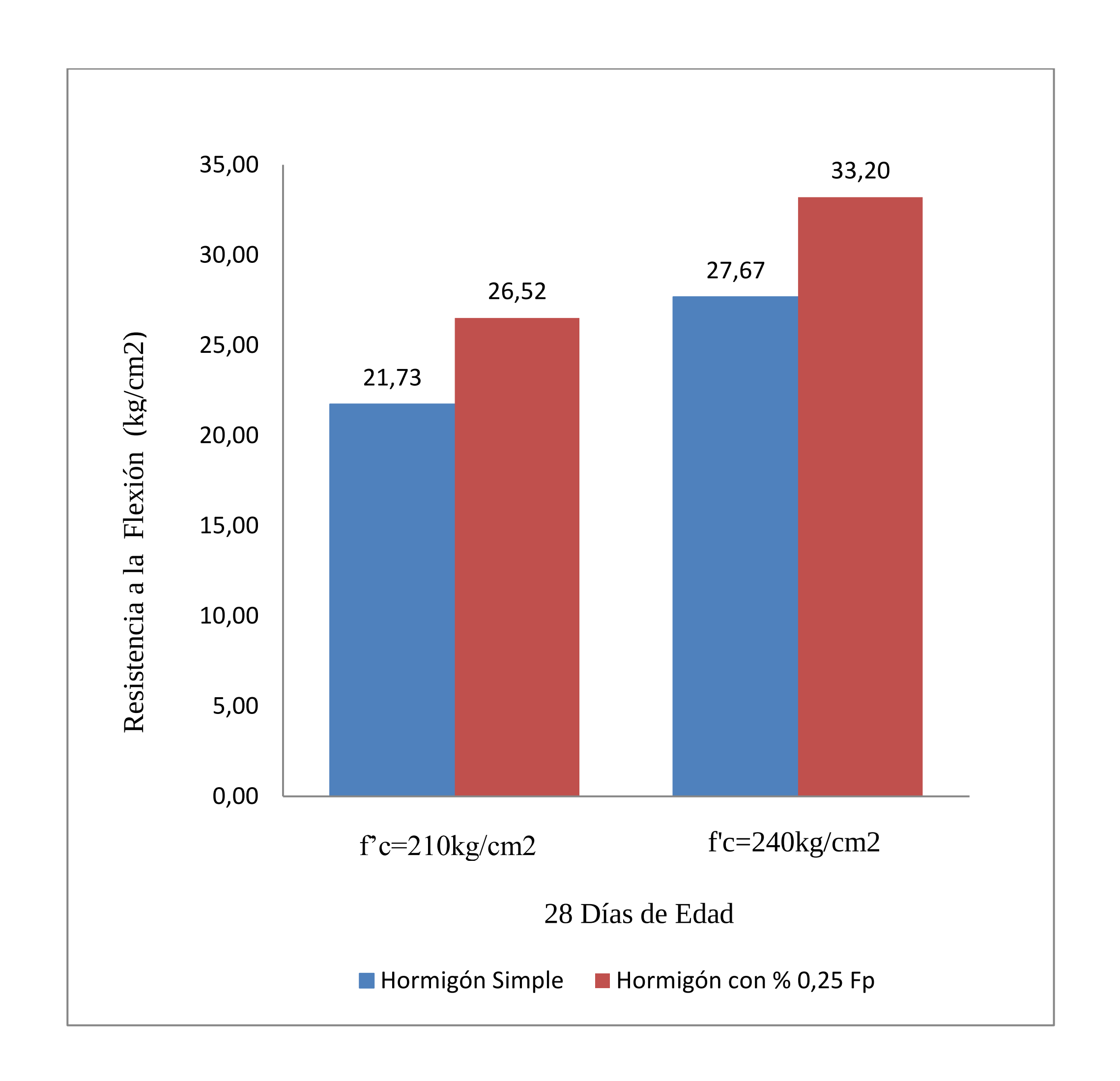
Interpretación del Gráfico:

De los ensayos de Tracción Indirecta realizados en cilindros de f'c=210 kg/cm2 y f'c=240 kg/cm2, en el hormigón reforzado con el 0,23% de fibra de polipropileno se puede apreciar un incremento considerable en la resistencia a la Tracción de aproximadamente el 40% en relación al hormigón simple (Sin Fibra).

Tabla # 77 Resistencia a la Flexión en Vigas de Hormigón Reforzados con (0,25 %) de Fibra de Polipropileno y el Hormigón Simple (Sin fibras)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO											
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA											
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL											
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA											
ENSAYO DE FLEXIÓN EN VIGAS DE HORMIGÓN REFORZADOS CON (0,25 %) DE FIBRA DE POLIPROPILENO Y EL HORMIGÓN SIMPLE (SIN FIBRAS) CON UNA CARGA PUNTUAL EN EL CENTRO DE LA LUZ											
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias									NORMA:	ASTM C-293
REALIZADO POR:	Egda. María Fernanda Millán					DIMENSIONES (CM):		15X15X76	LONGITUD DE MEDIDA (CM):		70
PROBETA Nº	IDENTIFICACIÓN	FECHA DE ELABORACIÓN	FECHA DE ENSAYO	ÁREA (CM2)	VOLUMEN (M3)	PESO DE VIGA (KG)	DENSIDAD (KG/M3)	CARGA (KG)	MÓDULO DE ROTURA (KG/CM2)	EDAD DÍAS	RELACIÓN σ COMPRESIÓN /σ FLEXION (%)
1	HORMIGÓN SIMPLE (f'c=210kg/cm2)	13/06/2013	11/07/2013	1125,0	0,017	38,7	2293,33	698,5	21,73	28	10,05
2	HORMIGÓN CON (0,25%) Fp (f'c=210kg/cm2)	13/06/2013	11/07/2013	1125,0	0,017	38,9	2305,19	852,4	26,52	28	11,79
3	HORMIGÓN SIMPLE (f'c=240kg/cm2)	14/06/2013	12/07/2013	1125,0	0,017	38,8	2299,26	889,5	27,67	28	11,21
4	HORMIGÓN CON (0,25%) Fp (f'c=240kg/cm2)	14/06/2013	12/07/2013	1125,0	0,017	38,9	2305,19	1067,3	33,20	28	12,94

Gráfico # 31 Resistencia a la Flexión en Vigas de Hormigón Reforzados con (0,25 %) de Fibra de Polipropileno y el Hormigón Simple (Sin fibras)



Interpretación del Gráfico:

De los ensayos de Flexión realizados en vigas de f'c=210 kg/cm2 y f'c=240 kg/cm2, en el hormigón reforzado con el 0,25% de fibra de polipropileno se puede apreciar un incremento considerable en la resistencia a la Flexión de aproximadamente el 20% en relación al hormigón simple (Sin Fibra).

Tabla # 78 Deflexión en Vigas de Hormigón f'c=210 kg/cm2 Reforzados con (0,25 %) de Fibra de Polipropileno y el Hormigón Simple (Sin fibras)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO						
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA						
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL						
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA						
DEFLEXIÓN EN VIGAS DE HORMIGÓN f´c = 210 kg/cm2 REFORZADOS CON (0,25 %) DE FIBRA DE POLIPROPILENO Y EL HORMIGÓN SIMPLE (SIN FIBRAS)						
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias			LONGITUD DE MEDIDA (M)		0,70
REALIZADO POR:	Egda. María Fernanda Millán			DIMENSIONES (CM):		15X15X75
FECHA DE ELABORACIÓN	FECHA DE ENSAYO	EDAD DÍAS	HORMIGÓN SIMPLE		HORMIGÓN CON (0,25%) Fp	
			CARGA (KG)	DEFLEXIÓN 5X10⁻² (mm)	CARGA (KG)	DEFLEXIÓN 5X10⁻² (mm)
13/06/2013	11/07/2013	28	0	0	0	0
			50	0	50	0
			100	0,1	100	0,1
			150	0,3	150	0,2
			200	0,5	200	0,4
			250	0,7	250	0,6
			300	0,9	300	0,8
			350	1,1	350	1,0
			400	1,3	400	1,2
			450	1,5	500	1,4
			500	1,7	600	1,6
			600	1,9	700	1,8
			650,0	2,0	852,4	2,0
			698,5	2,2	700	2,5
			650	2,3	600	2,8
			600	2,4	500	3,2
			500	2,6	450	3,6
			400	2,8	400	4,2
			350	3,0	350	5,2
			300	3,3	300	7,8
			250	3,7	250	10,9

Gráfico # 32 Deflexión en Vigas de Hormigón f'c=210 kg/cm2 Reforzados con (0,25 %) de Fibra de Polipropileno y el Hormigón Simple (Sin fibras)

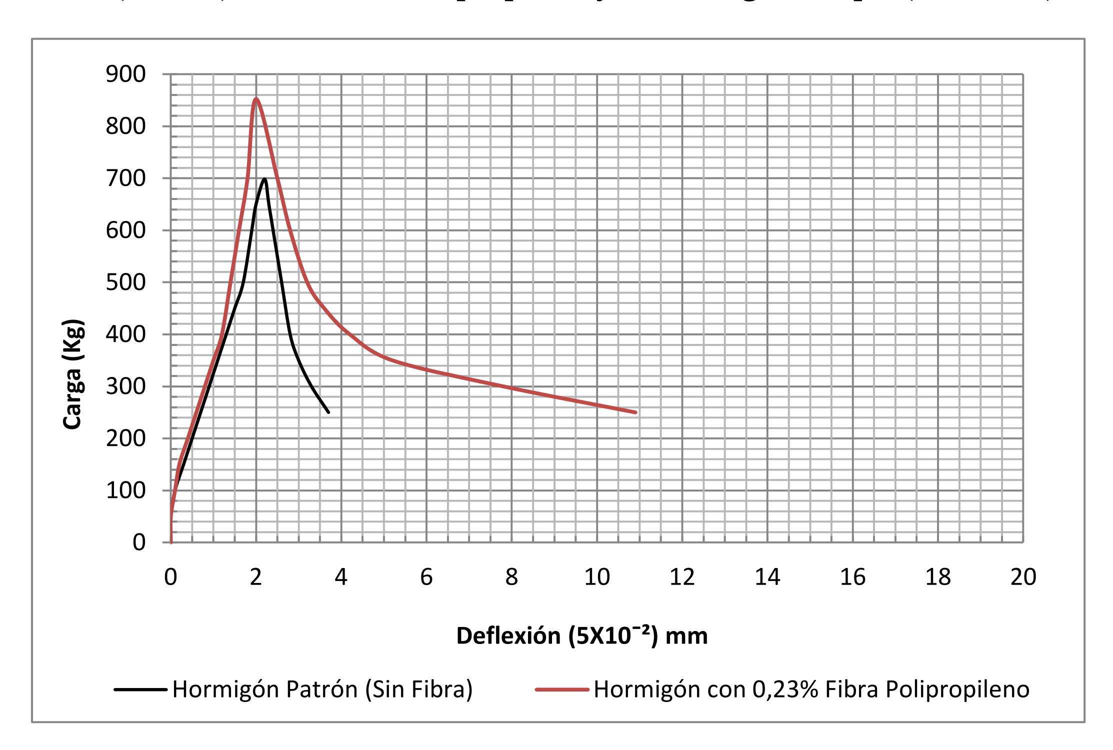


Tabla # 79 Deflexión en Vigas de Hormigón f'c=240 kg/cm2 Reforzados con (0,25 %) de Fibra de Polipropileno y el Hormigón Simple (Sin fibras)

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO						
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA						
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL						
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO Y SU INFLUENCIA EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS EN EL CANTÓN AMBATO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA						
DEFLEXIÓN EN VIGAS DE HORMIGÓN f´c = 240 kg/cm2 REFORZADOS CON (0,25 %) DE FIBRA DE POLIPROPILENO Y EL HORMIGÓN SIMPLE (SIN FIBRAS)						
ORIGEN:	Planta de Trituración de Áridos Constructora Arias				LONGITUD DE MEDIDA (M)	0,70
REALIZADO POR:	Egda. María Fernanda Millán				DIMENSIONES (CM):	15X15X75
FECHA DE ELABORACIÓN	FECHA DE ENSAYO	EDAD DÍAS	HORMIGÓN SIMPLE		HORMIGÓN CON (0,25%) Fp	
			CARGA (KG)	DEFLEXIÓN $5X10^{-2}$ (mm)	CARGA (KG)	DEFLEXIÓN $5X10^{-2}$ (mm)
14/06/2013	11/07/2013	28	0	0	0	0
			50	0	50	0
			100	0,1	100	0
			150	0,2	150	0,1
			200	0,4	200	0,3
			250	0,6	250	0,5
			300	0,8	300	0,7
			350	1,0	350	0,9
			400	1,2	400	1,1
			450	1,4	450	1,3
			500	1,6	500	1,4
			600	1,8	600	1,6
			700	2,0	700	1,7
			800	2,1	800	1,8
			889,5	2,2	900,0	1,9
			800	2,3	1067,3	2,2
			700	2,5	900	2,6
			600	2,7	800	2,8
			500	2,9	700	3,0
			450	3,0	600	3,3
			400	3,1	500	3,9
			350	3,2	400	5,1
			300	3,3	300	7,4
			250	3,5	250	10,2

Gráfico # 33 Deflexión en Vigas de Hormigón f'c=240 kg/cm2 Reforzados con (0,25 %) de Fibra de Polipropileno y el Hormigón Simple (Sin fibras)

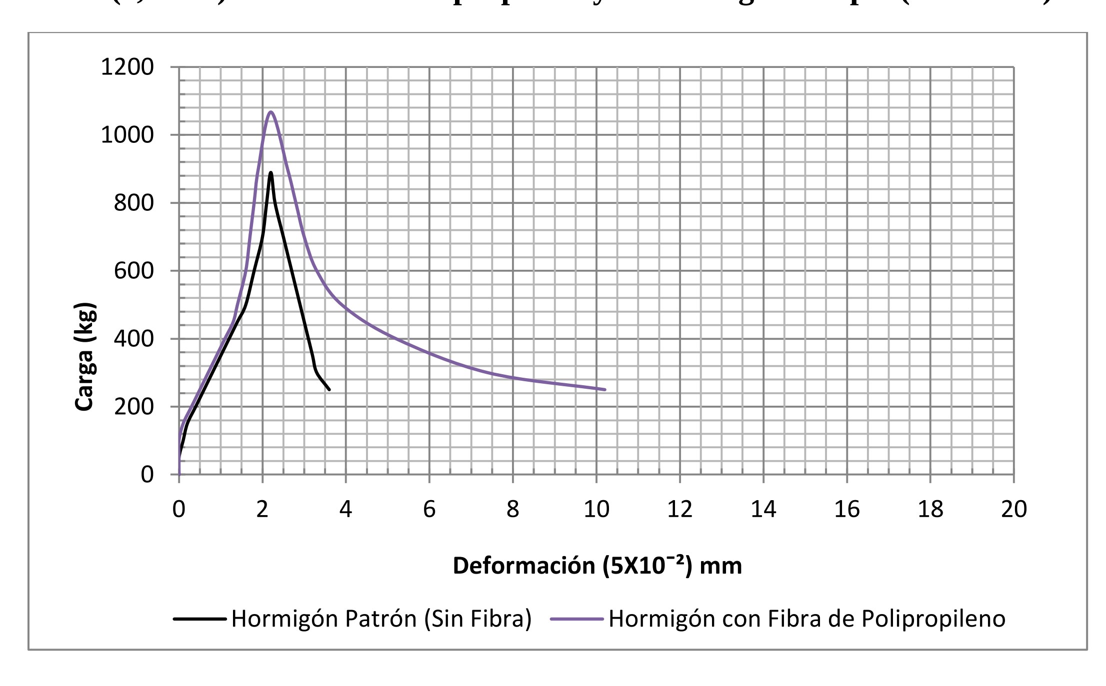
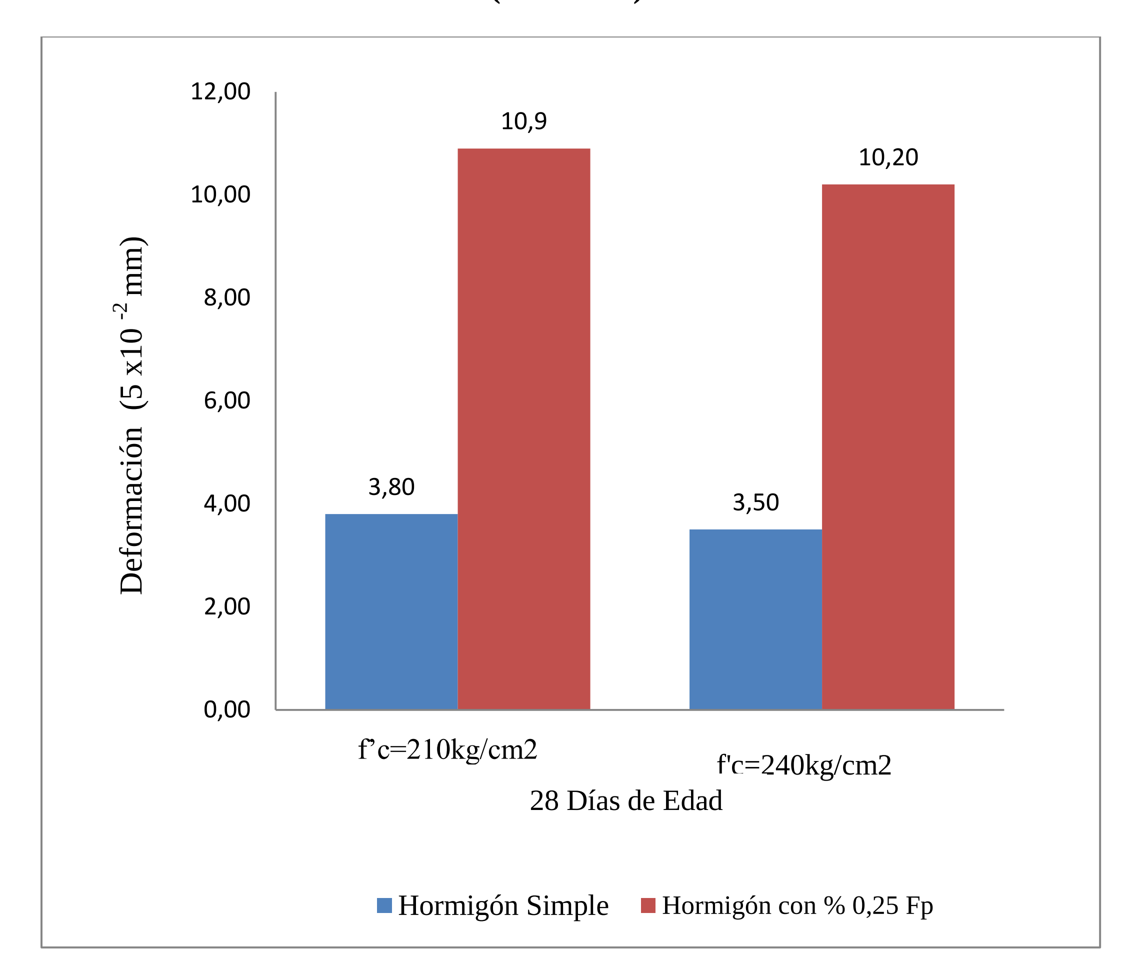


Gráfico # 34 Comparación entre la deflexión máxima en vigas de hormigón Reforzados con (0,25 %) de Fibra de Polipropileno y el Hormigón Simple (Sin fibras)



Interpretación del Gráfico:

La deformación del hormigón de f'c=210 kg/cm2 reforzado con fibra de polipropileno es superior al hormigón simple en 186%, mientras que el hormigón de f'c=240 kg/cm2 la deformación del hormigón reforzado con fibra fue 190% mayor que el hormigón simple, siendo clara la influencia de la fibra en el hormigón, permitiendo que éste sea mucho más dúctil con una mayor deformación.

6.7.5 CONCLUSIONES

- Una vez realizadas las dosificaciones con distintos porcentajes de fibra de polipropileno se concluye que el 0,23% es el porcentaje óptimo tanto para compresión como para tracción, mientras que para flexión el porcentaje óptimo fue de 0,25%, sin embargo considerando que la flexión es una combinación de la resistencia a la compresión y tracción, se recomienda utilizar el 0,23% de fibra de polipropileno.

- A medida que se incrementa la concentración de fibra en el hormigón después del porcentaje óptimo de fibra de polipropileno determinado, se pudo apreciar que la resistencia a compresión y tracción disminuye debido a que aumenta el contenido de aire en la mezcla, el cual crea menor adherencia entre la matriz cementante y la fibra.

- Con el objetivo de comparar el comportamiento mecánico del hormigón simple con el hormigón reforzado con fibras se llevó a cabo la rotura a compresión de varias muestras cilíndricas evidenciándose que la rotura de las probetas con fibras tienen la capacidad de mantenerse unidas pese al agrietamiento producido con relación a las probetas de hormigón simple, debido a que la fibra de polipropileno actúa como una red que une a la mezcla manteniéndolo como un solo elemento por un mayor tiempo, haciendo así más difícil su destrucción lo cual se convierte en un factor de seguridad en el caso de un desastre natural.

- La resistencia a flexión (módulo de rotura), no varía significativamente al incrementar el contenido de fibras ya que al alcanzar la probeta su resistencia máxima, aparecen las primeras fisuras e inicia la contribución de las fibras cosiendo la matriz del hormigón, además se observó que la rotura final de la viga se produce por arrancamiento y/o rotura de las fibras. Sin embargo la deflexión de la viga aumentó proporcionalmente con el contenido de fibras ya que al producirse las primeras fisuras la carga no cae bruscamente y el hormigón no se rompe, por el contrario sigue absorbiendo energía hasta

llegar a la rotura con una mayor deformación permitiendo una falla mucho mas dúctil, lo cual se evidencia con un incremento en la deflexión de aproximadamente tres veces del hormigón con fibras en relación al hormigón simple.

- Durante la inclusión de fibra de polipropileno en el hormigón se observó que influye en la trabajabilidad de la mezcla y en su consistencia a través de la disminución de su asentamiento en al menos 15 mm. Este fenómeno se produce debido a que las fibras proveen mayor cohesión entre las partículas del hormigón dándole mayor resistencia a la segregación. Este efecto de unión es más notorio mientras se incrementa el contenido de fibras.

6.7.6 RECOMENDACIONES

- Cuando se vaya a incluir fibra de polipropileno en el hormigón se recomienda realizar los estudios y análisis de las propiedades de los agregados ya que la selección y la longitud de la fibra depende del tamaño nominal del agregado grueso.

- Es recomendable que el tiempo de mezclado de la fibra de polipropileno en el hormigón no debe sobrepasar los 5 minutos ya que a mayor tiempo de mezclado se incluirá aire en el hormigón, creando menor adherencia entre la matriz cementante y la fibra.

- Se debe continuar con los estudios relacionados a la inclusión de fibras en el hormigón en la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, para contar con mayor información sobre los beneficios que éstas tienen en la industria de la construcción. Los resultados de esta investigación pueden servir de base para otras investigaciones sobre el mismo tema.

6.8 ADMINISTRACIÓN

El desarrollo del proyecto "Comportamiento del hormigón reforzado con fibras de polipropileno y su influencia en sus propiedades mecánicas en el Cantón Ambato, Provincia de Tungurahua", queda a cargo de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, de la Universidad Técnica de Ambato quién será portadora del estudio y sabrá dar a conocer a futuros proyectos.

6.9 PREVISIÓN DE LA EVALUACIÓN

La presente investigación servirá como una guía para la correcta utilización de la fibra de polipropileno en las diferentes obras de ingeniería civil, permitiendo que profesionales de la construcción consideren este tipo de material como refuerzo en el hormigón por qué ofrece una gran variedad de ventajas como se ha descrito anteriormente, mejorando la calidad del hormigón a través de sus propiedades mecánicas, además ayudará a optimizar los recursos debido a la facilidad y rapidez a diferencia de otros materiales.

C. MATERIALES DE REFERENCIA

1. BIBLIOGRAFÍA

ACI. American Concrete Institute, *An International symposium: fibre reinforced concrete*, Detroit: ACI, 1974 (ACI Special Publication SP-44)

BRAVO, José. *Comportamiento mecánico del Hormigón reforzado con fibras.* Chile, 2003.

BELTRÁN L., *"Hormigón reforzado con fibras de polipropileno", Tesis de Grado de la Escuela Politécnica Nacional, pp. 41, Quito, (1986).*

BOWLES, Joseph *"Manual de Laboratorio de Suelos. Editorial. Mc Graw – Hill México D.F., México.*

CAMANIERO, Raúl. *Dosificación de Mezclas*. Quito, 2008.

CHAN, José Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto (2003)

CONRADO, María Belén. *Diseño de Hormigones con Fibra para resistencia a la compresión*. Universidad Central, 2012

CUENCA, Estefanía. *Introducción Sobre HRF Y HAC.*

HANNANT, L., (1994), *"Fiber – Reinforced Cements and Concrets". En: ILLSTON, J., "Materiales de Construcción; su naturaleza y problemas", p. 359, Londres, (2002).*

HERNÁNDEZ, José *"Hormigón reforzado con fibra de polipropileno - Bloque II"*

JIMÉNEZ MONTOYA, Pedro. *Hormigón Armado*. 14a Edición. Editorial Gustavo Gili. Barcelona, 2001

MACCAFERRI, Nahan "Manual de Fibras para concreto"

MACÍAS, José. Utilización de Fibras en Hormigones, Quito, 2009

MEDINA, Santiago *"Ensayo de Materiales II"*

MEDINA, H. Cifuentes. "*Hormigón reforzado con fibras de polipropileno. influencia de la ductilidad de la fibra sobre la fragilidad y el efecto tamaño de la fibra."*

MARTINEZ D., *"Hormigones de Altas Prestaciones", Hormigón con Fibras, pp.264, (2000)*

MUÑOZ, Fernando. "*Hormigón reforzado con fibra de polipropileno multifilamento"*

NORMAS NTE INEN 2001

NORMAS ASTM

http://www.slideshare.net/deyvis120/propiedades-del-estado-fresco

http://www.wikipedia.org/wiki/Hormigón

http://www.hormigonespecial.com/nota/El-papel-de-las-fibras-de-polipropileno-para-el-refuerzo-de-hormigones.-20.html

http://www.centroamerica.basfcc.com/es/productos/concreto_premezclado/fibras_de_polipropileno/Pages/default.aspx

2. ANEXOS

2.1 IMÁGENES DEL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD REAL DEL CEMENTO

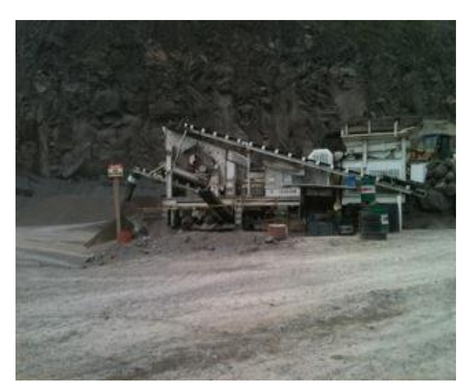




PLANTA DE TRITURACIÓN DE ÁRIDOS CONSTRUCTORA ARIAS

Trituración del material pétreo









FIBRA DE POLIPROPILENO

Distintas concentraciones de Fibra



Adición de la Fibra de Polipropileno en el Hormigón



DETERMINACIÓN DEL ASENTAMIENTO MEDIANTE EL CONO DE ABRAMS



Se retira el Cono de Abrams y se mide el asentamiento





ELABORACIÓN DE CILINDROS DE HORMIGÓN



CURADO DE CILINDROS DE HORMIGÓN



ELABORACIÓN DE VIGAS DE HORMIGÓN

CURADO DE VIGAS DE HORMIGÓN





ENSAYO DE COMPRESIÓN EN CILINDROS DE HORMIGÓN



Cosido de la Matriz de hormigón con fibra de polipropileno



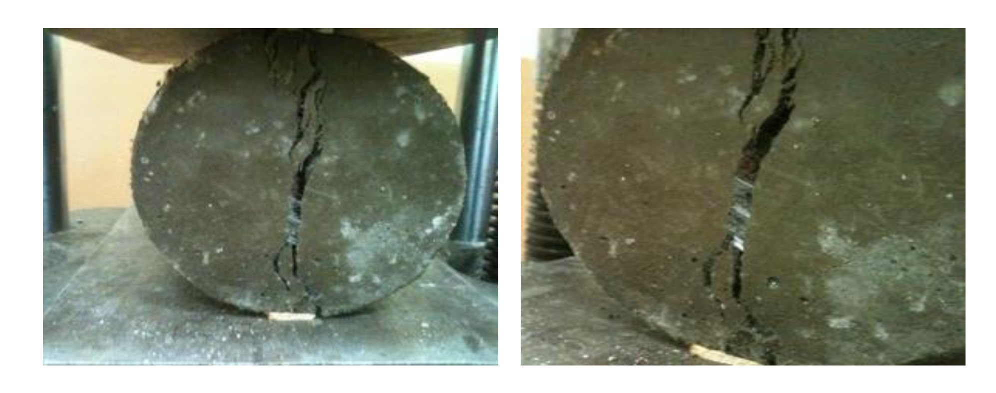
ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA EN CILINDROS DE HORMIGÓN



Diferencias del ensayo tracción de hormigón con y sin fibra de polipropileno



Cosido de la Matriz de hormigón con fibra de polipropileno



ENSAYO DE FLEXIÓN EN VIGAS DE HORMIGÓN

Centrado de la viga sobre los bloques de apoyo





Bloque de aplicación de carga en el centro de la luz libre de la viga





Falla de flexión en vigas

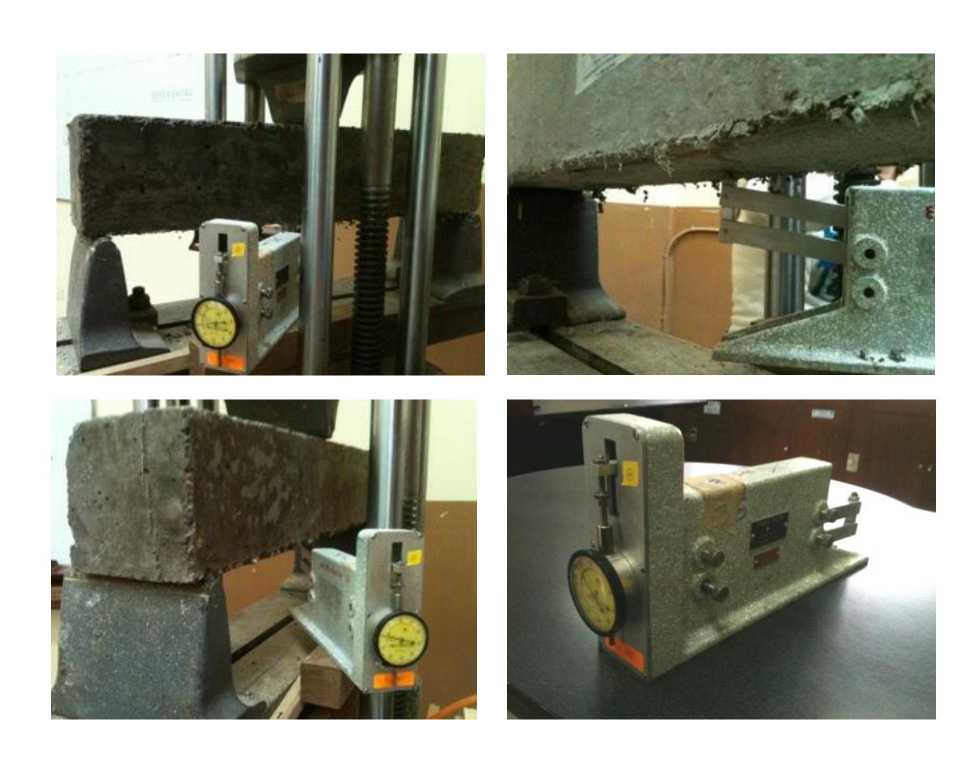








Utilización del Deflectómetro



Cosido de las fibras de polipropileno en la viga de hormigón



2.2. NORMAS EMPLEADAS

NTE INEN 156:2009*: CEMENTO HIDRÁULICO. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD.*

NTE INEN 1 578:2010: *HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO. DETERMINACIÓN DEL ASENTAMIENTO.*

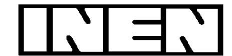
NTE INEN 1579:2013: *HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD, RENDIMIENTO Y CONTENIDO DE AIRE (MÉTODO GRAVIMÉTRICO)*

NTE INEN 1 576:2011: *HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO. ELABORACIÓN Y CURADO EN OBRA DE ESPECÍMENES PARA ENSAYO.*

NTE INEN 2 528:2010: *CÁMARAS DE CURADO, GABINETES HÚMEDOS, TANQUES PARA ALMACENAMIENTO EN AGUA Y CUARTOS PARA ELABORAR MEZCLAS, UTILIZADOS EN ENSAYOS DE CEMENTO HIDRÁULICO Y HORMIGÓN.*

NTE INEN 1 573:2010: *HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO.*

NORMA ACI 544: *"REPORT ON FIBER REINFORCED CONCRETE"*



INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN

Quito - Ecuador

FE DE ERRATAS
(2009-07-01)

NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 156:2009
Segunda revisión

CEMENTO HIDRÁULICO. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD.

Primera Edición

HYDRAULIC CEMENT. DETERMINATION OF DENSITY.

First Edition

En la página 3. Numeral 4.6.2

Reemplazar “(ver nota 5)” por “ (ver nota 6)”

En la página 3. Numeral 4.7.1

Reemplazar “(ver nota 6)” por “ (ver nota 7)”

En la página 3. Numeral 4.7.2

Reemplazar “(ver nota 6)” por “ (ver nota 7)”

En la página 3. Notas

Reemplazar “NOTA 5” por “NOTA 6”.

Reemplazar “NOTA 6” por “NOTA 7”.

DESCRIPTORES: Materiales de construcción, cemento hidráulico, ensayos.
CO 02.02-305
CDU: 666.94 :620.1
CIIU: 3692
ICS: 91.100.10

INEN

INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN

Quito - Ecuador

NORMA TÉCNICA ECUATORIANA

NTE INEN 156:2009
Segunda revisión

CEMENTO HIDRÁULICO. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD.

Primera Edición

HYDRAULIC CEMENT. DETERMINATION OF DENSITY.

First Edition

DESCRIPTORES: Materiales de construcción, cemento hidráulico, ensayos.
CO 02.02-305
CDU: 666.94:620.1
CIIU: 3692
ICS: 91.100.10



Norma Técnica Ecuatoriana Voluntaria	CEMENTO HIDRÁULICO. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD.	NTE INEN 156:2009 Segunda revisión 2009-06

1. OBJETO

1.1 Esta norma establece el método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico, mediante el método del frasco volumétrico de Le Chatelier.

2. ALCANCE

2.1 Este método se relaciona con el diseño y control de mezclas de hormigón.

2.2 Esta norma no tiene el propósito de contemplar todo lo concerniente a seguridad, si es que hay algo asociado con su uso. Es responsabilidad del usuario de esta norma establecer prácticas apropiadamente saludables y seguras y determinar la aplicabilidad de las limitaciones reguladoras antes de su uso.

3. DEFINICIONES

3.1 Para los efectos de esta norma se adoptan las definiciones contempladas en la NTE INEN 151 y la que a continuación se detalla:

3.1.1 *Densidad del cemento hidráulico ρ.* La densidad del cemento hidráulico está definida como la masa de un volumen unitario de los sólidos.

4. MÉTODO DE ENSAYO

4.1 Resumen. La determinación de la densidad de cemento hidráulico consiste en establecer la relación entre una masa de cemento y el volumen del líquido no reactivo que esta masa desplaza en el frasco de Le Chatelier.

4.2 Equipos

4.2.1 *Balanza*, con una precisión de 0,05 g

4.2.2 *Termómetro*, graduado con divisiones de 0,1°C

4.2.3 *Recipiente para baño de agua,* capaz de mantener una temperatura constante, con una variación máxima de 0,2°C.

4.2.4 *Frasco Le Chatelier.* Un frasco normalizado que tiene la sección transversal circular con forma y dimensiones esencialmente coincidentes con la Fig. 1, (ver nota 1). Los requerimientos de tolerancia considerados, acerca de inscripción y longitud, espaciamiento y uniformidad de graduación, deben ser rígidamente observados. La separación entre la marca de mayor graduación y el punto mas bajo del esmerilado del tapón de cristal, debe ser de por lo menos de 10 mm.

NOTA 1. El diseño tiene por objeto garantizar el drenaje completo del frasco cuando se vacíe y la estabilidad cuando está de pie sobre una superficie nivelada, así como la exactitud y la precisión de la lectura.

(Continúa)

DESCRIPTORES: Materiales de construcción, cemento hidráulico, ensayos.

4.2.4.1 Debe ser fabricado con un cristal de excelente calidad, transparente y libre de arrugas o estrías. El cristal debe ser químicamente resistente y debe tener una pequeña histéresis térmica. Los frascos deben ser templados completamente antes de ser graduados. Deben tener un espesor suficiente para asegurar una resistencia razonable a la rotura.

4.2.4.2 El cuello debe ser graduado desde 0 a 1 cm^3 y desde 18 cm^3 a 24 cm^3, en graduaciones de 0,1 cm^3. El error de cualquier capacidad indicada no deberá ser mayor que 0,05 cm^3.

4.2.4.3 Cada frasco debe llevar un número de identificación permanente y el tapón debe mantener el mismo número, a no ser que estos sean intercambiables. Las partes de cristal intercambiables deben ser marcadas en ambas secciones con un símbolo ahusado, seguido por la designación del tamaño. La temperatura normalizada debe ser indicada y la unidad de capacidad mostrada con las letras “mL” (ver nota 2) colocadas sobre la marca de graduación mas alta.

4.2.5 Se permite el uso de equipo o métodos alternativos para determinar la densidad, a condición de que el mismo operador pueda obtener resultados dentro de $\pm$ 0,03 g/cm^3 o Mg/m^3 (ver nota 3) de los resultados obtenidos utilizando el método del frasco.

4.3 Reactivos y materiales. En la determinación de la densidad se debe utilizar querosén libre de agua, o nafta, que tenga una densidad mayor que 0,73 g/ cm^3 a 23 °C $\pm$ 2 °C.

4.4 Preparación de la muestra

4.4.1 Realizar el ensayo para determinar la densidad del cemento en el material tal como se recibe, a menos que se especifique de otro modo. Si se requiere la determinación de la densidad en una muestra libre de pérdidas, primero se debe calcinar la muestra como se describe en la sección 16.1 de la norma ASTM C 114.

4.4.2 Para cemento portland, pesar alrededor de 64 g con una aproximación de 0,05 g.

4.5 Procedimiento

4.5.1 Llenar el frasco con cualquiera de los líquidos especificados en 4.3 hasta un punto en la parte baja del cuello entre las marcas 0 cm^3 y 1 cm^3, (ver nota 4). Si es necesario, se debe secar el interior del frasco sobre el nivel del líquido después de llenarlo. Registrar la primera lectura después de sumergir el frasco en un baño de agua (ver nota 5) de acuerdo con 4.5.3.

4.5.2 El cemento, previamente pesado se introduce en pequeños incrementos a la misma temperatura que el líquido, evitando salpicaduras (ver nota 4), observar que el cemento no se adhiera al interior del frasco sobre el líquido. Un aparato vibrador puede ser utilizado para acelerar la introducción del cemento dentro del frasco y para prevenir que el cemento se atasque en el cuello. Después de que todo el cemento ha sido introducido, colocar el tapón en el frasco, rodarlo en posición inclinada (ver nota 4), o suavemente girarlo en círculos horizontales, de manera de liberar el aire hasta que ya no suban burbujas a la superficie del líquido. Si ha sido añadida una cantidad adecuada de cemento, el nivel del líquido estará en su posición final en algún punto de las graduaciones en la parte superior del cuello. Registrar la lectura final después de que el frasco ha sido sumergido en el baño de agua de acuerdo con 4.5.3.

4.5.3 Sumergir el frasco en un baño de agua a temperatura constante por períodos de tiempo suficientes, con el fin de evitar variaciones de temperatura en el frasco mayores a 0,2°C entre las lecturas inicial y final.

NOTA 2. Los frascos comercializados internacionalmente llevan generalmente la marca “mL” como medida de volumen, que equivale a centímetros cúbicos en el SI.

NOTA 3. La densidad en megagramos por metro cúbico (Mg/m^3) es numéricamente igual a gramos por centímetro cúbico (g/cm^3).

NOTA 4. Es aconsejable utilizar un cojín de caucho sobre la superficie de la mesa al llenar o hacer rodar el frasco.

NOTA 5. Antes de añadir el cemento al frasco, se puede colocar como masa un anillo de plomo que calce holgadamente alrededor del cuello del frasco, que es útil para mantener el frasco en posición vertical en el baño de agua o se puede sostener el frasco en el baño de agua con una pinza de buretas.

(Continúa)

4.6 Cálculos

4.6.1 La diferencia entre las lecturas inicial y final representa el volumen del líquido desplazado por la masa del cemento utilizado en el ensayo.

Calcular la densidad del cemento, ρ, de la siguiente manera.

$$\rho\,(\text{g/cm}^3) = (\text{Mg/m}^3) = \frac{\text{masa del cemento , g}}{\text{volumen desplazado , cm}^3}$$

4.6.2 Para la dosificación y control de mezclas de hormigón, la densidad puede ser más útil expresada como gravedad específica que es un número adimensional. Calcular la gravedad específica de la siguiente manera (ver nota 5):

$$\text{Gr. esp} = \frac{\text{densidad del cemento}}{\text{densidad del agua a } 4°\text{C}}$$

4.7 Precisión y desviación

4.7.1 Se ha encontrado que la desviación estándar para un solo operador para cemento portland es de 0,012; por lo tanto, el resultado de dos ensayos adecuadamente realizados por el mismo operador en el mismo material no debe diferir en más de 0,03 (ver nota 6).

4.7.2 Se ha encontrado que la desviación estándar multilaboratorios para cemento portland es 0,037; por lo tanto el resultado de dos ensayos adecuadamente realizados por dos laboratorios diferentes en muestras del mismo cemento no deben diferir en más de 0,10, (ver nota 6).

4.7.3 Ya que no hay material de referencia aceptado que sea adecuado para determinar alguna desviación, que pueda ser asociada con este método de ensayo, no se hace ninguna declaración sobre desviación.

4.8 Informe de resultados

4.8.1 Se debe elaborar un informe que contenga por lo menos los siguientes datos:

a) marca y tipo de cemento,

b) fechas de fabricación, muestreo y ensayo,

c) variación de temperatura en el frasco,

d) nombre del laboratorista que efectuó el ensayo,

e) densidad del cemento, **ρ**, en g/cm^3 o Mg/m^3,

f) cualquier otro detalle necesario para la completa identificación de la muestra ensayada.

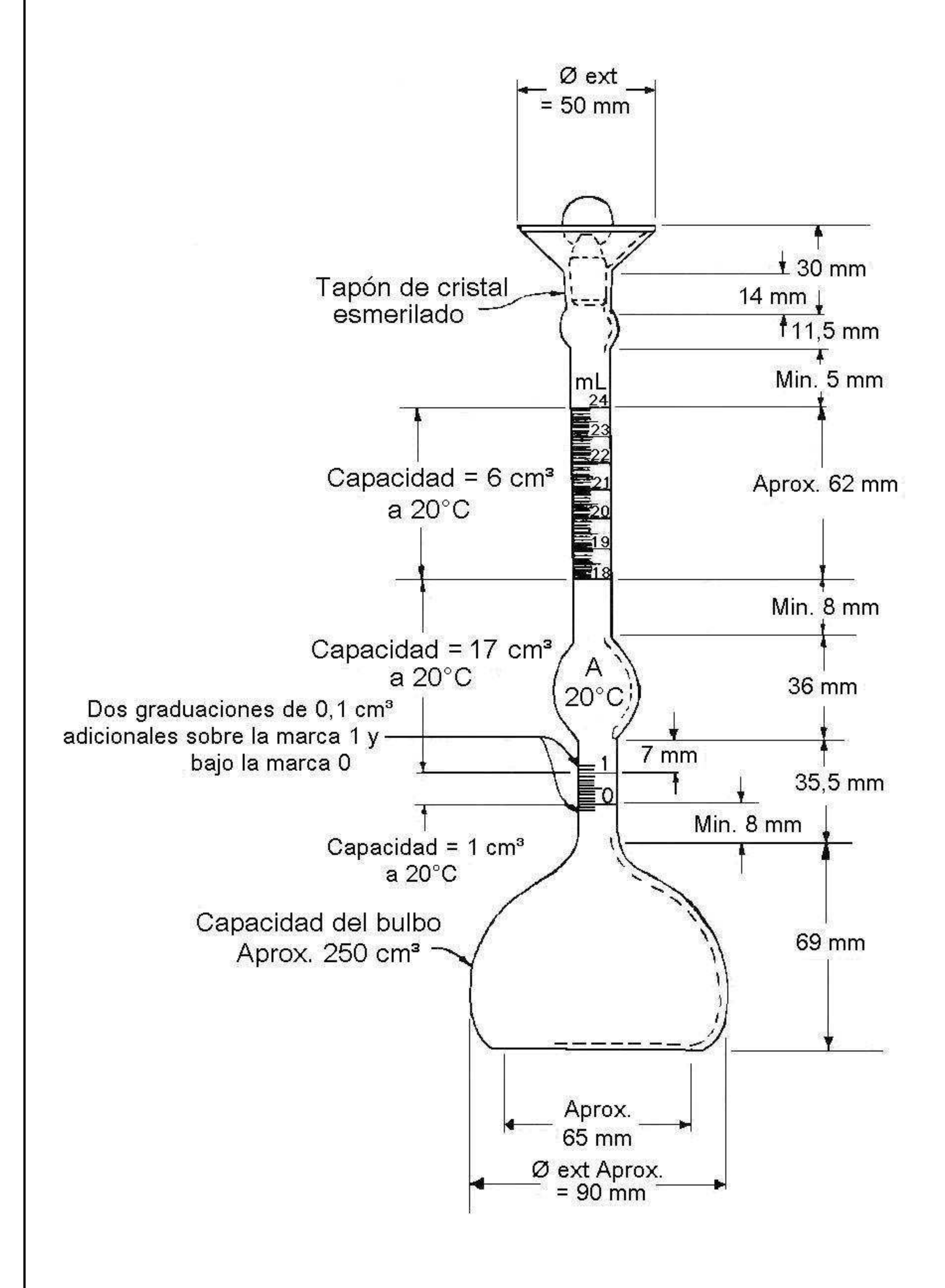
NOTA 5. La densidad del agua a 4 °C es de 1 Mg/m^3 (1 g/cm^3).

NOTA 6. Estos números representan los límites 1s y 2s descritos en la norma ASTM C 670.

(Continúa)

ANEXO A

FIGURA 1. Frasco de Le Chatelier para el ensayo de densidad.



NOTAS:

(a) El volumen desplazado en mililitros (ml) es numéricamente igual al volumen desplazado en centímetros cúbicos (1 ml=1cm^3).

(b) Deben esperarse variaciones de unos pocos milímetros en dimensiones tales como la altura total del frasco, diámetro de la base, etc., y no deben ser consideradas causa suficiente para rechazo. Las dimensiones del frasco mostrado en la Fig. 1 se aplican solo a frascos nuevos y no para frascos en uso que cumplen con los otros requerimientos de esta norma

(Continúa)

APÉNDICE Z

Z.1 DOCUMENTOS NORMATIVOS A CONSULTAR

Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 151	*Cemento. Definición de términos relacionados con el cemento hidráulico. (Segunda revisión)*
Norma ASTM C 114	*Métodos de Ensayo para Análisis Químico del Cemento Hidráulico.*
Norma ASTM E 670	*Norma para la Preparación de Declaraciones de Precisión y Desviación para Métodos de Ensayo para Materiales de Construcción*

Z.2 BASE DE ESTUDIO

Norma ASTM C 188 – 03. *Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement*. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, 2003.

INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA

Documento: NTE INEN 156 Segunda revisión	TÍTULO: CEMENTO HIDRÁULICO. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD	Código: CO 02.02-305

ORIGINAL:	REVISIÓN:
Fecha de iniciación del estudio:	Fecha de aprobación anterior por Consejo Directivo 1987-02-25 Oficialización con el Carácter de Obligatoria por Resolución No. 169 de 1987-03-09 publicado en el Registro Oficial No. 722 DE 1987-07-06 Fecha de iniciación del estudio:

Fechas de consulta pública: de a

Subcomité Técnico: CEMENTOS
Fecha de iniciación: 2007-11-21 Fecha de aprobación: 2008-01-18
Integrantes del Subcomité Técnico:

NOMBRES:	INSTITUCIÓN REPRESENTADA:
Ing. Raúl Camaniero (Presidente)	FACULTAD DE INGENIERÍA. UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR.
Ing. Jaime Salvador	INSTITUTO ECUATORIANO DEL CEMENTO Y EL CONCRETO
Ing. Patricia Moreno	HOLCIM S.A. (CEMENTOS)
Ing. Hugo Egüez	HOLCIM S.A. (AGREGADOS)
Sr. Carlos Aulestia	LAFARGE CEMENTOS S.A.
Ing. Luis Quinteros	CEMENTO CHIMBORAZO C.A.
Ing. Patricio Ruiz	CEMENTOS GUAPÁN S.A.
Ing. Raúl Ávila	HORMIGONES HÉRCULES S.A.
Ing. Guillermo Realpe	FACULTAD DE INGENIERÍA. UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR.
Ing. Washington Benavides	FACULTAD DE INGENIERÍA. UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR.
Ing. Carlos Proaño	MINISTERIO DE DESARROLLO URBANO Y VIVIENDA.
Ing. Miguel Altamirano	HORMIGONES DEL VALLE
Ing. Xavier Herrera	HORMIGONERA QUITO.
Ing. Carlos Castillo (Pro Secretario Técnico)	INECYC

Otros trámites:

El Directorio del INEN aprobó este proyecto de norma en sesión de 2009-02-27

Oficializada como: Voluntaria Por Resolución No. 018-2009 de 2009-03-24
Registro Oficial No. 616 de 2009-06-19

Instituto Ecuatoriano de Normalización, INEN - Baquerizo Moreno E8-29 y Av. 6 de Diciembre
Casilla 17-01-3999 - Telfs: (593 2)2 501885 al 2 501891 - Fax: (593 2) 2 567815
Dirección General: E-Mail:direccion@inen.gob.ec
Área Técnica de Normalización: E-Mail:normalizacion@inen.gob.ec
Área Técnica de Certificación: E-Mail:certificacion@inen.gob.ec
Área Técnica de Verificación: E-Mail:verificacion@inen.gob.ec
Área Técnica de Servicios Tecnológicos: E-Mail:inenlaboratorios@inen.gob.ec
Regional Guayas: E-Mail:inenguayas@inen.gob.ec
Regional Azuay: E-Mail:inencuenca@inen.gob.ec
Regional Chimborazo: E-Mail:inenriobamba@inen.gob.ec
URL:www.inen.gob.ec



INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN

Quito - Ecuador

NORMA TÉCNICA ECUATORIANA **NTE INEN 1 578:2010**
Primera revisión

HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO. DETERMINACIÓN DEL ASENTAMIENTO.

Primera Edición

STANDART TEST METHOD FOR SLUMP OPF HYDRAULIC – CEMENT CONCRETE.

First Edition

DESCRIPTORES: Materiales de construcción y edificación, hormigón y productos de hormigón, asentamiento, ensayo.
CO 02.10-304
CDU: : 691.32:620.163.1
CIIU: 3699
ICS: 91.100.30



Norma Técnica Ecuatoriana Voluntaria	**HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO. DETERMINACIÓN DEL ASENTAMIENTO**	**NTE INEN 1 578:2010 Primera revisión 2010-06**

1. OBJETO

1.1 Esta norma establece el método de ensayo para determinar el asentamiento del hormigón de cemento hidráulico tanto en el laboratorio como en el campo.

2. ALCANCE

2.1 Esta norma tiene por objeto proporcionar al usuario un procedimiento para determinar el asentamiento de hormigones de cemento hidráulico en estado plástico, (ver nota 1).

2.2 Este método de ensayo se aplica al hormigón en estado plástico, preparado con árido grueso con tamaño de hasta 37,5 mm. Si el tamaño del árido grueso es mayor a 37,5 mm, este método de ensayo se aplica cuando se realiza sobre la fracción de hormigón que pasa el tamiz de 37,5 mm, con la eliminación de las partículas de árido de mayor tamaño, de acuerdo con el numeral 7 de la NTE INEN 1 763.

2.3 Este método de ensayo no se aplica al hormigón no plástico y no cohesivo, (ver nota 2).

3. DISPOSICIONES GENERALES

3.1 El texto de esta norma hace referencia a notas en pie de página, las cuales proveen material explicativo y no deben ser consideradas como requisitos de esta norma.

3.2 Esta norma no tiene el propósito de contemplar todo lo concerniente a seguridad, si es que hay algo asociado con su uso. Es responsabilidad del usuario de esta norma establecer prácticas apropiadamente saludables y seguras y determinar la aplicabilidad de las limitaciones reguladoras antes de su uso.

3.3 **Advertencia**. Las mezclas frescas de cemento hidráulico son cáusticas y pueden causar quemaduras químicas a la piel y tejidos bajo exposición prolongada

4. MÉTODO DE ENSAYO

4.1 **Resumen.** Una muestra de hormigón recién mezclado se coloca dentro de un molde con forma de un cono truncado y se compacta con una varilla. Se levanta el molde permitiendo que el hormigón se asiente. Se mide la distancia vertical entre la altura original y la del centro desplazado de la superficie superior del hormigón, luego de su deformación. Este valor se reporta como el asentamiento del hormigón.

NOTA 1. Este método de ensayo fue desarrollado originalmente para proporcionar una técnica para monitorear la consistencia del hormigón en estado plástico. Se ha encontrado que por lo regular, en condiciones de laboratorio y con un estricto control de todos los materiales del hormigón, el asentamiento aumenta proporcionalmente con el contenido de agua en una mezcla dada de hormigón y por lo tanto es inversamente proporcional a la resistencia del hormigón; sin embargo, en condiciones de campo, dicha relación con la resistencia no se aprecia en forma clara o de manera consistente. Es por ello que se debe tener cuidado al correlacionar los resultados de asentamientos obtenidos en condiciones de campo con la resistencia.

NOTA 2. Hormigones que tienen asentamientos menores a 15 mm pueden no ser suficientemente plásticos y hormigones que tienen asentamientos mayores a 230 mm pueden no ser suficientemente cohesivos para que este ensayo sea significativo. Se debe tener precaución en la interpretación de tales resultados.

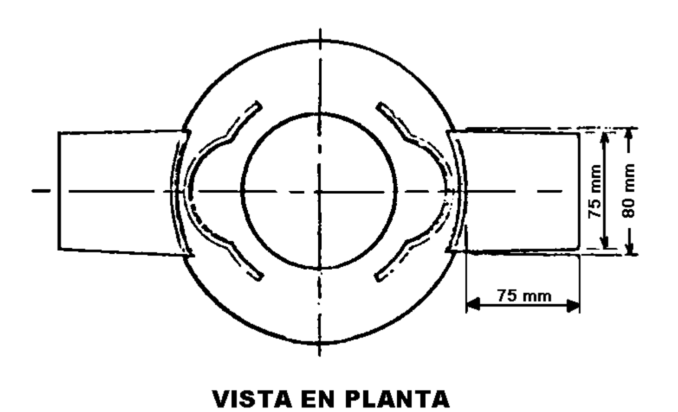
(Continúa)

DESCRIPTORES: Materiales de construcción y edificación, hormigón y productos de hormigón, asentamiento, ensayo

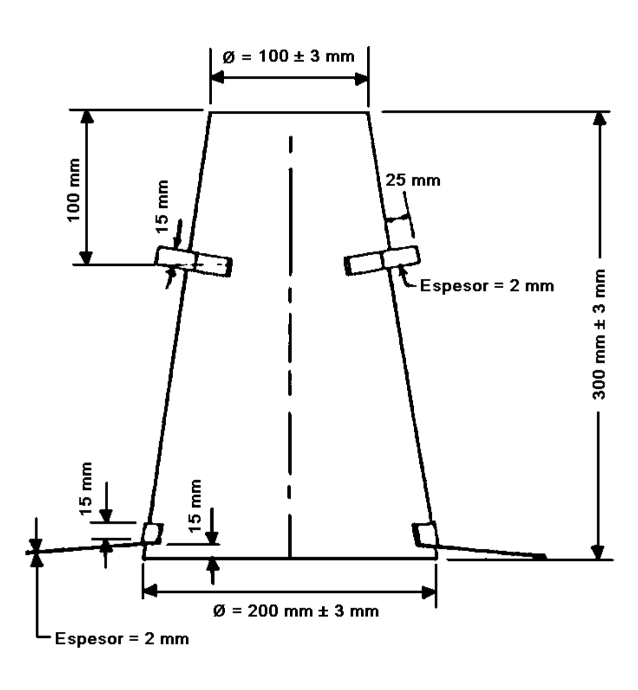
4.2 Equipos

4.2.1 *Molde*. El espécimen para ensayo debe ser elaborado en un molde de metal que no sea fácilmente atacado por la pasta de cemento. El metal no debe tener un espesor menor a 1,5 mm y si se forma por el proceso de rolado, no debe haber ningún punto en el molde en el que el espesor sea inferior a 1,15 mm. El molde debe tener la forma de un cono truncado, con diámetros internos de 200 mm en la base, 100 mm en la parte superior y altura de 300 mm. Los diámetros y alturas individuales deben tener una tolerancia de ± 3 mm de las dimensiones especificadas. La base y la parte superior del cono deben ser abiertas, paralelas entre sí y perpendiculares al eje longitudinal del cono. El molde debe estar provisto de dos estribos para apoyar los pies y manijas similares a los mostrados en la figura 1. Debe construirse sin costura. El interior debe estar relativamente liso y libre de imperfecciones, abolladuras, deformaciones o de mortero adherido. Puede aceptarse un molde que se sujete a una placa base no absorbente, siempre que el sistema de fijación sea tal que pueda ser liberado completamente sin movimiento del molde y que la base sea lo suficientemente grande para contener todo el volumen del hormigón asentado, para un ensayo aceptable.

FIGURA 1. Molde para ensayo de asentamiento



VISTA EN PLANTA



4.2.1.1 Verificar y registrar la conformidad de las dimensiones del molde con las especificadas, al momento de su compra o en la primera puesta en servicio y al menos una vez por año.

(Continúa)

4.2.1.2 *Molde fabricado con materiales alternativos*.

a) Se permite el uso de moldes diferentes al metálico si satisfacen los siguientes requisitos: el molde debe cumplir con la forma, altura y los requisitos de dimensiones internas del numeral 4.2.1; debe ser lo suficientemente rígido para mantener las dimensiones y tolerancias especificadas durante el uso, resistente a las fuerzas de impacto y además de material no absorbente; debe demostrar que proporciona resultados comparables a los que se obtienen cuando se utiliza un molde de metal que reúne los requisitos del numeral 4.2.1, esta demostración debe ser realizada por el fabricante en un laboratorio de ensayos independiente. Los ensayos comparativos deben estar compuestos al menos por 10 pares consecutivos de comparaciones realizados con tres hormigones con asentamientos diferentes, comprendidos en el rango de 50 mm a 200 mm (ver nota 3). Ningún resultado de ensayo individual debe variar en más de 15 mm respecto al que se obtiene utilizando el molde de metal. El promedio de los resultados de ensayo de cada rango de asentamiento obtenido con el molde de material alternativo no debe variar en más de 6 mm del promedio de los resultados de ensayo obtenidos usando el molde de metal. Los datos del ensayo de comparación del fabricante deben estar a disposición de los usuarios y de las autoridades de inspección del laboratorio (ver nota 4). Si se realiza cualquier cambio en el material o en el método de fabricación se debe repetir los ensayos de comparación.

b) Si se sospecha que cualquier molde individual esta fuera de tolerancia con relación de la condición de fabricación, se debe realizar un solo ensayo comparativo. Si los resultados difieren en más de 15 mm de los obtenidos utilizando el molde de metal, el molde debe ser retirado del servicio.

4.2.2 *Varilla de compactación*. Debe ser una varilla recta, lisa, de acero, de 16 mm de diámetro y aproximadamente 600 mm de longitud, teniendo el extremo de compactación o los dos extremos redondeados con punta semiesférica, cuyo diámetro es de 16 mm.

4.2.3 *Instrumento de medida*. Puede utilizarse una regla, cinta de medir enrollada de metal o un instrumento similar de medición rígido o semirrígido, marcado en incrementos de 5 mm o menos. La longitud del instrumento debe ser de al menos 300 mm.

4.2.4 *Cucharón*. De un tamaño lo suficientemente grande para que cada cantidad de hormigón obtenida del recipiente de muestreo sea representativa y lo suficientemente pequeño como para que no se derrame durante la colocación en el molde.

4.3 Muestreo. La muestra de hormigón para elaborar los especímenes de ensayo debe ser representativa de toda la amasada. Debe ser obtenida de acuerdo con los procedimientos descritos en la NTE INEN 1 763.

4.4 Procedimiento

4.4.1 Humedecer el molde y colocarlo sobre una superficie plana, rígida, húmeda y no absorbente. El operador debe sostener firmemente el molde en su lugar durante el llenado y la limpieza del perímetro, parándose sobre los dos estribos o fijándolo a la placa base como se describe en el numeral 4.2.1. Inmediatamente después de obtener la muestra de hormigón, de conformidad con el numeral 4.3, llenar el molde en tres capas, cada una de aproximadamente un tercio del volumen del molde (ver nota 5). Colocar el hormigón en el molde utilizando el cucharón descrito en el numeral 4.2.4. Mover el cucharón siguiendo el perímetro de la abertura del molde para asegurar una distribución uniforme del hormigón con una mínima segregación.

NOTA 3. La frase "pares consecutivos de comparaciones" no significa sin interrupción o en un solo día. En una programación seleccionada por la entidad que realiza los ensayos, los pares de ensayos que conducen a 10 pares consecutivos puede llevarse a cabo en grupos pequeños. La palabra "consecutivos" no significa ignorar los pares de ensayos que no cumplan con los criterios.

NOTA 4. Debido a que el asentamiento del hormigón disminuye con el tiempo y con temperaturas elevadas, es ventajoso realizar los ensayos de comparación alternando el uso de conos de metal y los de material alternativo y la utilización de algunos técnicos para minimizar el tiempo entre los procedimientos de ensayo.

NOTA 5. El primer tercio del volumen del molde de asentamiento, se llena a una altura de 70 mm, el segundo tercio del volumen se llena a una altura de 160 mm, medidos desde la base.

(Continúa)

4.4.2 Compactar cada capa con 25 golpes utilizando la varilla de compactación. Distribuir de manera uniforme los golpes sobre la sección transversal de cada capa. Para la capa inferior, es necesario inclinar la varilla ligeramente y dar aproximadamente la mitad de los golpes cerca del perímetro y luego continuar con golpes verticales en espiral hacia el centro. Compactar la capa inferior en toda su profundidad. Compactar la segunda capa y la capa superior, cada una en toda su profundidad, de tal manera que los golpes apenas penetren en la capa anterior.

4.4.3 Al llenar la capa superior, mantener un excedente de hormigón sobre la parte superior del molde antes de empezar la compactación. Si durante la operación de compactación, la superficie del hormigón queda por debajo del borde superior del molde, agregar más hormigón para mantener en todo momento un exceso de hormigón sobre la parte superior del molde. Después de haber compactado la capa superior, enrasar la superficie del hormigón rodando la varilla de compactación sobre el borde superior del molde. Continuar presionando el molde firmemente hacia abajo y retirar el hormigón del área que rodea la base del molde para evitar interferencias con el movimiento de asentamiento del hormigón. De inmediato retirar el molde del hormigón levantándolo cuidadosamente en dirección vertical. Levantar el molde en su altura de 300 mm en 5 s ± 2 s con un movimiento ascendente uniforme y sin movimientos laterales o de torsión. Completar todo el ensayo desde el inicio del llenado hasta la remoción del molde sin interrupción dentro de un periodo de 2 ½ minutos.

4.4.4 Inmediatamente medir el asentamiento determinando la diferencia vertical entre la parte superior del molde y el centro original desplazado de la superficie superior del espécimen. Si ocurre un desprendimiento o corte del hormigón de una parte o porción de la masa (ver nota 6), desechar el ensayo y hacer un nuevo ensayo con otra porción de la muestra.

4.5 Informe de resultados. Se debe elaborar un informe de resultados que contenga al menos lo siguiente:

a) Fecha y lugar de ensayo,
b) Nombre del laboratorio y del laboratorista que realizó el ensayo,
c) Identificación de la muestra,
d) Tipo de molde utilizado,
e) Informar si el hormigón se ha tamizado en húmedo, para retirar partículas de tamaño mayor a 37,5 mm,
f) El asentamiento en milímetros, con una aproximación de 5 mm de asentamiento del espécimen durante el ensayo,
g) Otros detalles necesarios para la completa identificación de la muestra.

4.6 Precisión y desviación

4.6.1 *Precisión*. Las estimaciones de precisión de este método de ensayo se basan en los resultados de los ensayos realizados en Fayetteville, Arkansas por 15 técnicos de 14 laboratorios, que representan a 3 estados. Todos ensayados en 3 rangos de asentamiento diferentes desde 25 mm a 160 mm, fueron realizados utilizando la misma amasada de hormigón premezclado. El hormigón fue entregado y ensayado con un bajo asentamiento, para producir un hormigón de asentamiento moderado y finalmente de alto asentamiento, se le agregó agua y se lo mezcló nuevamente. En la mezcla de hormigón se utilizó una piedra caliza triturada de 19 mm (No. 67) y arena de río lavada, contenía 297 kg de material cementante por metro cúbico. Los 297 kg se dividieron por igual entre un cemento que cumple los requisitos del Tipo I / II y cenizas volantes de clase C. Se utilizó una dosis doble de un retardante químico en un intento de minimizar las pérdidas de asentamiento y mantener la trabajabilidad del hormigón. Las temperaturas del hormigón variaron desde 30℃ a 34℃. Las pérdidas de asentamiento promediaron 17 mm durante los 20 minutos necesarios para realizar una serie de 6 pruebas a un rango asentamiento. Los ensayos se realizaron usando moldes de metal y plástico alternadamente, que fueron previamente seleccionados para producir resultados comparables. Los datos de precisión por lo tanto se aplican a los moldes de metal y de plástico. Se realizaron un total de 270 pruebas de asentamiento.

4.6.1.1 *Medición de variabilidad*. Se determinó que la desviación estándar era la medida más coherente de la variabilidad y se encontró que varía con el valor del asentamiento.

NOTA 6. Si dos ensayos consecutivos en una muestra de hormigón presentan una caída o un corte de la masa del espécimen, el hormigón probablemente carece de la plasticidad y la cohesión necesarias para que sea aplicable el ensayo de asentamiento

(Continúa)

4.6.1.2 *Precisión para un solo operador*. La desviación estándar para un solo operador representada por (1s) se muestra en la tabla 1 mediante valores promedio de asentamiento. Los resultados finales para las lecturas de ensayos de repetición, se aplican a los ensayos realizados por el mismo operador, llevando a cabo ensayos sucesivos, uno inmediatamente después del otro. Los resultados aceptables de dos ensayos correctamente realizados por el mismo operador en el mismo material (ver nota 7) no deben diferir entre sí en más del valor (d2s) de la última columna de la tabla 1 para el valor apropiado de asentamiento.

4.6.1.3 *Precisión multilaboratorio*. La desviación estándar multilaboratorio representada por (1s) se muestra en la tabla 1 mediante valores promedio de asentamiento. Los resultados finales para las lecturas de ensayos de repetición se aplican a los ensayos realizados por diferentes operadores de diferentes laboratorios, desarrollando ensayos a intervalos menores de 4 minutos. Por lo tanto, los resultados aceptables de dos ensayos de asentamiento correctamente realizados en el mismo material (ver nota 7) por dos laboratorios diferentes, no deben diferir entre sí en más del valor (d2s) de la última columna de la tabla 1 para el valor apropiado de asentamiento.

4.6.2 *Desviación*. Este método de ensayo no presenta desviación, debido a que el asentamiento es definido solamente en términos de este método de ensayo.

TABLA 1. Precisión

Asentamiento e Índice de tipo	Desviación estándar (1s) [A]	Rango aceptable de dos resultados (d2s) [A]
Precisión para un solo operador:		
Asentamiento 30 mm	6 mm	17 mm
Asentamiento 85 mm	9 mm	25 mm
Asentamiento 160 mm	10 mm	28 mm
Precisión multilaboratorio:		
Asentamiento 30 mm	7 mm	20 mm
Asentamiento 85 mm	10 mm	28 mm
Asentamiento 160 mm	13 mm	37 mm

[A] Estos números representan, respectivamente, los límites (1s) y (d2s) descritos en la norma ASTM C 670.

NOTA 7. “El mismo material” es utilizado para designar a una mezcla de hormigón fresco de una misma amasada.

(Continúa)

APÉNDICE Z

Z.1 DOCUMENTOS NORMATIVOS A CONSULTAR

Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1 763	*Hormigón fresco. Muestreo.*
Norma ASTM C 670	*Práctica para la preparación de informes de precisión y desviación para métodos de ensayo para materiales de construcción.*

Z.2 BASE DE ESTUDIO

ASTM C 143 – 08. *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, 2008.

INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA

Documento: NTE INEN 1 578 Primera revisión	**TÍTULO: HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO. DETERMINACIÓN DEL ASENTAMIENTO**	**Código: CO 02.10-304**

ORIGINAL: Fecha de iniciación del estudio:	REVISIÓN: Fecha de aprobación anterior del Consejo Directivo 1990-06-26 Oficialización con el Carácter de **Obligatoria y Emergente** por Acuerdo Ministerial No. 413 de 1990-08-20 publicado en el Registro Oficial No. 524 de 1990-09-18 Fecha de iniciación del estudio: 2009-09-14

Fechas de consulta pública: de a

Subcomité Técnico: HORMIGÓN, ÁRIDOS Y MORTEROS
Fecha de iniciación: 2009-09-18 Fecha de aprobación: 2009-10-01
Integrantes del Subcomité Técnico:

NOMBRES:	**INSTITUCIÓN REPRESENTADA:**
Ing. Guillermo Realpe (Presidente)	FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
Ing. José Arce (Vicepresidente)	HORMIGONES HÉRCULES S. A.
Ing. Jaime Salvador	INSTITUTO ECUATORIANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO. INECYC.
Ing. Raúl Ávila	ASOCIACIÓN DE PRODUCTORES DE HORMIGÓN PREMEZCLADO DEL ECUADOR. APRHOPEC.
Ing. Hugo Egüez	HOLCIM ECUADOR S. A. AGREGADOS
Ing. Raúl Cabrera	HOLCIM ECUADOR S. A. HORMIGONES
Sr. Carlos Aulestia	LAFARGE CEMENTOS S. A.
Ing. Xavier Arce	CÁMARA CONSTRUCCIÓN GUAYAQUIL.
Ing. Marlon Valarezo	UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
Arq. Soledad Moreno .	INTACO ECUADOR S. A.
Ing. Carlos González	INTACO ECUADOR S. A.
Ing. Víctor Buri	HORMIGONES HÉRCULES S. A.
Ing. Douglas Alejandro	MUNICIPIO DE GUAYAQUIL.
Ing. Verónica Miranda	COLEGIO INGENIEROS CIVILES PICHINCHA / HORMIGONES EQUINOCCIAL
Ing. Diana Sánchez	FACULTAD DE INGENIERÍA. PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR.
Ing. Stalin Serrano	HORMIGONES EQUINOCCIAL.
Ing. Xavier Herrera	HORMIGONERA QUITO
Ing. Mireya Martínez	CAMINOSCA CIA. LTDA.
Ing. Rubén Vásquez	CEMENTO CHIMBORAZO C. A.
Ing. Víctor Luzuriaga	INDUSTRIAS GUAPÁN S. A.
Ing. Patricio Torres	DICOPLAN CIA. LTDA.
Ing. Luis Balarezo	CUERPO DE INGENIEROS DEL EJÉRCITO
Ing. Carlos Castillo (Prosecretario Técnico)	INECYC.

Otros trámites: ♦[4] La NTE INEN 1 578:1990 sin ningún cambio en su contenido fue **DESREGULARIZADA,** pasando de **OBLIGATORIA a VOLUNTARIA,** según Acuerdo Ministerial No. 235 de 1998-05-04 publicado en el Registro Oficial No. 321 del 1998-05-20.
Esta NTE INEN 1 578:2010 (Primera Revisión), reemplaza a la NTE INEN 1 578:1990

El Directorio del INEN aprobó este proyecto de norma en sesión de 2010-03-26

Oficializada como: **Voluntaria** Por Resolución No. 036-2010 de 2010-04-02
Registro Oficial No. 213 de 2010-06-14

Instituto Ecuatoriano de Normalización, INEN - Baquerizo Moreno E8-29 y Av. 6 de Diciembre
Casilla 17-01-3999 - Telfs: (593 2)2 501885 al 2 501891 - Fax: (593 2) 2 567815
Dirección General: E-Mail:direccion@inen.gov.ec
Área Técnica de Normalización: E-Mail:normalizacion@inen.gov.ec
Área Técnica de Certificación: E-Mail:certificacion@inen.gov.ec
Área Técnica de Verificación: E-Mail:verificacion@inen.gov.ec
Área Técnica de Servicios Tecnológicos: E-Mail:inencati@inen.gov.ec
Regional Guayas: E-Mail:inenguayas@inen.gov.ec
Regional Azuay: E-Mail:inencuenca@inen.gov.ec
Regional Chimborazo: E-Mail:inenriobamba@inen.gov.ec
URL:www.inen.gov.ec



Quito - Ecuador

NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 1579:2013

HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD, RENDIMIENTO Y CONTENIDO DE AIRE (MÉTODO GRAVIMÉTRICO)

Primera edición

CONCRETE OF HYDRAULIC CEMENT. DENSITY, YIELD AND AIR CONTENT (GRAVIMETRIC METHOD) DETERMINATION

First edition

DESCRIPTORES: Materiales de construcción y edificación, hormigón, hormigón de cemento hidráulico, densidad rendimiento, contenido de aire, método gravimétrico, ensayo.
CO 02.10-334
CDU: 669.94:620.1
CIIU: 3692
ICS: 11.100.30



Norma Técnica Ecuatoriana Voluntaria	HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD, RENDIMIENTO Y CONTENIDO DE AIRE (MÉTODO GRAVIMÉTRICO)	NTE INEN 1579:2013 2013-03

1. OBJETO

1.1 Esta norma establece el método de ensayo para determinar la densidad del hormigón recién mezclado y proporciona las fórmulas para calcular el rendimiento, el contenido de cemento y el contenido de aire del hormigón de cemento hidráulico.

2. ALCANCE

2.1 Este método de ensayo se aplica a hormigones con densidades que están entre 1 850 kg/m³ y 2 480 kg/m³. Este método de ensayo no es aplicable a hormigones utilizados en la fabricación de tuberías y unidades para albañilería.

3. DEFINICIONES

3.1 Para los efectos de esta norma, se adopta la siguiente definición:

3.1.1 *Rendimiento.* Es el volumen de hormigón producido en una mezcla, de la que se conocen las cantidades de los materiales componentes.

4. SIMBOLOGÍA

A = Contenido de aire en el hormigón (porcentaje de vacíos)
C = Contenido real de cemento, (kg/m³)
C_b = Masa del cemento en la amasada, (kg)
D = Densidad del hormigón, (kg/m³)
M = Masa total de todos los materiales en la amasada, (kg) (ver nota 1)
M_c = Masa del recipiente de medición lleno con hormigón, (kg)
M_m = Masa del recipiente de medición, (kg)
R_y = Rendimiento relativo
T = Densidad teórica del hormigón calculada en una condición libre de aire, (kg/m³) (ver nota 2),
Y = Rendimiento, volumen del hormigón producido por amasada, (m³)
Y_d = Volumen teórico del hormigón en el diseño de mezcla, (m³)
Y_f = Volumen del hormigón producido por amasada, (m³)
V = volumen absoluto total de los ingredientes que componen la amasada, (m³)
V_m = Volumen del recipiente de medición, (m³)

NOTA 1. La masa total de todos los materiales en la amasada es la suma de las siguientes masas: cemento, árido fino (en la condición de uso), árido grueso (en la condición de uso), agua de mezcla añadida a la amasada y de cualquier otro material sólido o líquido utilizado.

NOTA 2. La densidad teórica es generalmente determinada en el laboratorio, este valor se supone que permanece constante para todas las amasadas elaboradas con ingredientes y proporciones idénticos. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$T = \frac{M}{V} \qquad (1)$$

El volumen absoluto de cada ingrediente en metros cúbicos es igual a la masa del ingrediente en kilogramos dividido para 1 000 veces su gravedad específica. Para los áridos, la masa y la gravedad específica deben ser determinadas en la condición saturada superficialmente seca. Para el cemento, la densidad real debe ser determinada mediante el procedimiento de la NTE INEN 156. Para el cemento que cumple con los requisitos de la NTE INEN 152, se puede utilizar un valor de 3,15.

(Continúa)

DESCRIPTORES: Materiales de construcción y edificación, hormigón, hormigón de cemento hidráulico, densidad rendimiento, contenido de aire, método gravimétrico, ensayo.

5. DISPOSICIONES GENERALES

5.1 Esta norma no tiene el propósito de contemplar todo lo concerniente a seguridad, si es que hay algo asociado con su uso. Es responsabilidad del usuario de esta norma establecer prácticas apropiadamente saludables y seguras, y determinar la aplicabilidad de las limitaciones reguladoras antes de su uso.

5.2 El texto de esta norma hace referencia a notas en pie de página, las cuales proveen material explicativo y no deben ser consideradas como requisitos de esta norma.

6. MÉTODO DE ENSAYO

6.1 Resumen. La muestra de hormigón para este ensayo se la obtiene de acuerdo con la NTE INEN 1763. Una vez determinada la masa del hormigón compactada dentro de un recipiente, se relaciona para el volumen del mismo obteniéndose de esta forma la densidad del hormigón. El método de compactación es elegido en función de la consistencia del hormigón.

6.2 Equipos

6.2.1 *Balanza*. Una balanza o una báscula, que tenga una exactitud de 45 g o dentro del 0,3% de la carga de ensayo, el que sea mayor, en cualquier punto dentro del rango de uso. Se considera que el rango de uso se extiende desde el valor de la masa del recipiente de medición vacío hasta el valor de la masa del recipiente más su contenido con una densidad de 2 600 kg/m³.

6.2.2 *Varilla de compactación*. Debe ser una varilla recta, lisa, de acero, con un diámetro de 16 mm ± 2 mm. La longitud de la varilla debe ser de al menos 100 mm mayor que la profundidad del recipiente de medición en el cual se va a realizar la compactación, pero no superior a 600 mm de longitud total (ver nota 3). La varilla debe tener el borde compactador o ambos extremos redondeados con una punta semiesférica del mismo diámetro de la varilla.

6.2.3 *Vibradores internos*. Que tengan ejes rígidos o flexibles, de preferencia impulsados por motores eléctricos. La frecuencia de vibración debe ser de 7 000 vibraciones por minuto o superior, mientras está en uso. El diámetro exterior o la dimensión lateral del elemento vibrante debe ser al menos de 19 mm, pero no superior a 38 mm. La longitud del eje debe ser de al menos 600 mm.

6.2.4 *Recipiente de medición*. Un contenedor cilíndrico de acero o de otro metal apropiado (ver nota 4). La capacidad mínima del recipiente debe cumplir con los requisitos de la tabla 1 en función del tamaño nominal del árido en el hormigón que se va a ensayar. Todos los recipientes, excepto los recipientes de medición de aire los cuales se utilizan también para los ensayos de esta norma, deben cumplir con los requisitos de la NTE INEN 858. Cuando se utilizan los recipientes para medición de aire, deben cumplir con los requisitos de la norma ASTM C 231 y estar calibrado para el volumen descrito en la NTE INEN 858. El borde superior del medidor de aire debe ser liso y plano dentro de 0,3 mm (ver nota 5).

NOTA 3. Una varilla con longitud de 400 mm a 600 mm cumple con los requisitos de esta y las siguientes normas: NTE INEN 1576, NTE INEN 1578, ASTM C 138, ASTM C 173 y ASTM C 231.

NOTA 4. El metal no debe ser fácilmente atacable por la pasta de cemento. Sin embargo, se pueden utilizar materiales reactivos, tales como las aleaciones de aluminio, en los casos en que como consecuencia de una reacción inicial, se forme rápidamente una película superficial que proteja el metal contra la corrosión.

NOTA 5. Se considera que el borde superior plano es adecuado, si no es posible insertar un calibrador de 0,3 mm entre el anillo y una placa de vidrio de 6 mm de espesor o más grueso colocada sobre el borde del recipiente de medición.

TABLA 1. Capacidad del recipiente de medición

Tamaño máximo nominal del árido grueso (mm)	Capacidad del recipiente de medición [A]	
	(L)	(m³)
25,0	6	0,006
37,5	11	0,011
50	14	0,014
75	28	0,028
112	70	0,070
150	100	0,100

[A] Se debe utilizar el tamaño indicado del recipiente para el ensayo del hormigón que contenga áridos de un tamaño máximo nominal igual o menor señalado en esta tabla. El volumen real del recipiente de medición debe ser de al menos el 95% del volumen nominal indicado.

6.2.5 *Placa de enrasado*. Una placa plana rectangular de metal, con un espesor de al menos 6 mm o una placa de vidrio o de acrílico de al menos 12 mm de espesor, con una longitud y un ancho de al menos 50 mm mayor que el diámetro del recipiente de medición que se va a utilizar. Los bordes de la placa deben ser rectos y lisos con una tolerancia de 2 mm.

6.2.6 *Martillo*. Con cabeza de goma o de cuero, debe tener una masa de 600 g ± 200 g cuando se lo utiliza con recipientes de 14 litros o menores y con una masa de 1 000 g ± 200 g cuando se lo utiliza con recipientes de mayor capacidad que 14 litros.

6.2.7 *Cucharón*. De un tamaño suficientemente grande para que cada cantidad de hormigón obtenida del recipiente en el que se tomó la muestra, sea representativa y lo suficientemente pequeña para que el hormigón no se derrame durante la colocación en el molde.

6.3 Muestreo. Obtener la muestra de hormigón recién mezclado, de acuerdo con la NTE INEN 1763.

6.4 Procedimiento

6.4.1 A menos que en las especificaciones se indique el método de compactación, este se escogerá en función al asentamiento de la mezcla. Los métodos de compactación son: compactación por varillado y vibración interna. Se debe compactar por varillado el hormigón con un asentamiento mayor a 75 mm, compactar por varillado o vibrar el hormigón con un asentamiento entre 25 mm a 75 mm y vibrar el hormigón con un asentamiento menor a 25 mm (ver nota 6).

6.4.2 Colocar el hormigón en el recipiente de medición utilizando el cucharón que se describe en el numeral 6.2.7. Mover el cucharón alrededor del perímetro de la abertura del recipiente para asegurar una distribución uniforme del hormigón y con mínima segregación. Llenar el recipiente con el número de capas requeridas por el método de compactación, ver numerales 6.4.3 o 6.4.4.

6.4.3 *Compactación por varillado*. Colocar el hormigón en el recipiente en tres capas de aproximadamente igual volumen. Compactar cada capa introduciendo 25 veces la varilla de compactación, cuando se utilice un recipiente de volumen nominal de 14 litros o menor, con 50 veces cuando se utilice un recipiente de volumen nominal de 28 litros y una vez por cada 20 cm² de la superficie para recipientes mayores. Compactar cada capa uniformemente sobre la sección transversal con el extremo redondeado de la varilla, empleando el número requerido de inserciones. Compactar la capa inferior en toda su profundidad. En la compactación de esta capa, se debe tener cuidado de no dañar el fondo del recipiente. Para cada capa superior, permitir que la varilla penetre toda la capa que está siendo compactada e ingrese a la capa inferior aproximadamente 25 mm. Luego de que cada capa sea compactada, golpear los lados del recipiente de 10 a 15 veces con el martillo apropiado (ver el numeral 6.2.6) con una fuerza tal para cerrar cualquier agujero dejado por la varilla y eliminar cualquier burbuja grande de aire que hubiere sido atrapada. Colocar la capa final evitando un llenado excesivo.

NOTA 6. Este método de ensayo no se aplica para el hormigón sin plasticidad, comúnmente utilizado en la fabricación de tuberías y unidades de albañilería.

6.4.4 *Vibración interna*. Llenar y vibrar el recipiente en dos capas aproximadamente iguales. Colocar todo el hormigón para cada capa en el recipiente antes de iniciar la vibración de esa capa. Insertar el vibrador en tres puntos diferentes para cada capa. En la compactación de la capa inferior, no permitir que el vibrador permanezca o toque el fondo o los lados del medidor. En la compactación de la capa final, el vibrador debe penetrar en la capa subyacente aproximadamente 25 mm. Tener cuidado de retirar el vibrador de tal manera que no se produzcan bolsas de aire en el espécimen. La duración requerida de la vibración depende de la trabajabilidad del hormigón y de la efectividad del vibrador (ver nota 7). Continuar la vibración únicamente hasta lograr una compactación adecuada del hormigón (ver nota 8). Mantener una duración constante de la vibración para cada tipo particular de hormigón, de vibrador y de recipiente involucrados.

6.4.5 Al término de la compactación, el recipiente no debe contener un exceso notable o deficiencia de hormigón. Se considera óptimo un exceso de hormigón que sobresale aproximadamente 3 mm sobre la parte superior del molde. Se puede añadir una pequeña cantidad de hormigón para corregir alguna deficiencia. Si el recipiente contiene un gran exceso de hormigón en la finalización de la compactación, retirar una porción representativa del exceso de hormigón con una paleta o un cucharón inmediatamente después de finalizar la compactación y antes de realizar el enrasado en el recipiente.

6.4.6 *Enrasado*. Luego de la compactación, enrasar la superficie del hormigón y alisarlo utilizando la placa de enrasado, de manera que el recipiente quede lleno y nivelado. Enrasar el hormigón presionando la placa de enrasado sobre la parte superior del recipiente hasta cubrir alrededor de dos tercios de la superficie y retirar la placa con un movimiento de corte para terminar solamente el área cubierta. A continuación, colocar la placa sobre el borde superior del recipiente para cubrir dos tercios de la superficie y avanzar con una presión vertical y un movimiento de corte para cubrir toda la superficie del recipiente y continuar avanzando hasta que se deslice completamente fuera del recipiente. Inclinar la placa y realizar varias pasadas finales con el borde de la placa para obtener una superficie lisa.

6.4.7 *Limpieza y pesaje*. Luego del enrasado, limpiar todo el exceso de hormigón del exterior del recipiente y determinar la masa del hormigón y recipiente con una precisión consistente con los requisitos del numeral 6.2.1.

6.5 Cálculos

6.5.1 *Densidad*. Calcular la masa neta del hormigón en kilogramos, restando la masa del recipiente, M_m, de la masa del recipiente lleno con hormigón, M_c. Calcular la densidad, D, dividiendo la masa neta de hormigón para el volumen del recipiente, V_m, de la siguiente manera:

$$D = \frac{M_c - M_m}{V_m} \qquad (2)$$

6.5.2 *Rendimiento*. Calcular el rendimiento de la siguiente manera:

$$Y\ (m^3) = \frac{M}{D} \qquad (3)$$

6.5.3 *Rendimiento relativo*. El rendimiento relativo es el cociente entre el volumen real del hormigón obtenido respecto al volumen de diseño de la amasada (ver nota 9), calculado de la siguiente manera:

NOTA 7. Por lo general, el hormigón ha sido suficientemente vibrado cuando su superficie se torne relativamente lisa.

NOTA 8. El exceso de vibración puede causar segregación y pérdida de cantidades apreciables del aire que ha sido intencionalmente incorporado.

NOTA 9. Un valor de R_y mayor a 1,00 indica un exceso del hormigón que se produce mientras que un valor inferior indica que la amasada "tiene un volumen menor" al volumen de diseño.

$$R_y = \frac{Y}{Y_d} \qquad (4)$$

6.5.4 *Contenido de cemento*. Calcular el contenido real de cemento de la siguiente manera:

$$C = \frac{C_b}{Y} \qquad (5)$$

6.5.5 *Contenido de aire*. Calcular el contenido de aire de la siguiente manera:

$$A = \frac{T - D}{T} \times 100 \qquad (6)$$

o

$$A = \frac{Y - V}{Y} \times 100 \qquad (7)$$

6.6 Informe de resultados. Se debe elaborar un informe de resultados que contenga al menos lo siguiente:

a) Laboratorio y fecha de ensayo,
b) Identificación de hormigón representado por la muestra,
c) Volumen de la densidad medida, con una precisión de 0,01 litros,
d) Densidad, con una precisión de 1,0 kg/m³,
e) Rendimiento, cuando se lo solicite, con una precisión de 0,1 m³,
f) Rendimiento relativo, cuando se lo solicite, con una precisión de 0,01,
g) Contenido de cemento, cuando se lo solicite, con una precisión de 0,5 kg,
h) Contenido de aire, cuando se lo solicite, con una precisión de 0,1%, e,
i) Otros detalles necesarios para la completa identificación de la muestra.

6.7 Precisión y desviación

6.7.1 Las estimaciones de precisión para este método de ensayo se basan en la recolección de datos por la National Ready Mixed Concrete Association (ver nota 10). Los datos representan mezclas de hormigón con un asentamiento de 75 mm a 150 mm y la densidad está en un rango entre 1 842 kg/m³ a 2 483 kg/m³ e incluye hormigones con aire incorporado y sin aire incorporado. El estudio se realizó utilizando recipientes de medición de 7 litros y de 14 litros.

6.7.1.1 *Precisión para un solo operador*. Se ha encontrado que la desviación estándar de un solo operador para la densidad del hormigón recién mezclado es de 10,4 kg/m³ (1s). Por lo tanto, los resultados de dos ensayos adecuadamente realizados por el mismo operador, en la misma muestra de hormigón no deben diferir en más de 29,6 kg/m³ (d2s) (ver nota 11).

6.7.1.2 *Precisión para varios operadores*. Se ha encontrado que la desviación para varios operadores para la densidad del hormigón recién mezclado es de 13,1 kg/m³ (1s). Por lo tanto, los resultados de dos ensayos adecuadamente realizados por dos operadores, en la misma muestra de hormigón no deben diferir en más de 37,0 kg/m³ (d2s) (ver nota 11).

6.7.2 *Desviación*. Este método de ensayo no tiene desviación porque la densidad está definida solamente en términos de este método de ensayo.

NOTA 10. Mullings, G. M., NRMCA/NAA Joint Research Lab Study “Series D324 Accuracy of Concrete Density Test,” Feb. 17, 2000.C09.

NOTA 11. Estos números representan los límites (1s) y (d2s), respectivamente, como se describen en la norma ASTM C 670.

APÉNDICE Z

Z.1 DOCUMENTOS NORMATIVOS A CONSULTAR

Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 152	*Cemento portland. Requisitos*.
Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 156	*Cemento hidráulico. Determinación de la densidad.*
Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 858	*Áridos. Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico) y el porcentaje de vacíos.*
Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1576	*Hormigón de cemento hidráulico. Elaboración y curado en obra de especímenes para ensayo.*
Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1578	*Hormigón de cemento hidráulico. Determinación del asentamiento.*
Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1763	*Hormigón de cemento hidráulico. Muestreo.*
Norma ASTM C 138	*Método de ensayo para determinar la densidad (masa unitaria), rendimiento y contenido de aire (gravimétrico) del hormigón.*
Norma ASTM C 173	*Método de ensayo para determinar el contenido de aire en el hormigón mezclado fresco, por el método volumétrico*.
Norma ASTM C 231	*Método de ensayo para determinar el contenido de aire en el hormigón mezclado fresco, por el método de presión*.
Norma ASTM C 670	*Práctica para la preparación de informes de precisión y desviación para métodos de ensayo para materiales de construcción*

Z.2 BASE DE ESTUDIO

ASTM C 138 – 10b. *Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete*. American Society for Testing and Materials. 2010.

INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA

Documento: NTE INEN 1579	TÍTULO: HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD, RENDIMIENTO Y CONTENIDO DE AIRE (MÉTODO GRAVIMÉTRICO)	Código: CO 01.10-334

ORIGINAL:	REVISIÓN:
Fecha de iniciación del estudio:	Fecha de aprobación anterior del Consejo Directivo Oficialización con el Carácter de por Acuerdo Ministerial No. publicado en el Registro Oficial No. Fecha de iniciación del estudio:

Fechas de consulta pública: de a

Subcomité Técnico: **Hormigones, áridos y morteros**
Fecha de iniciación: 2012-01-26 Fecha de aprobación: 2012-01-26
Integrantes del Subcomité Técnico:

NOMBRES:	**INSTITUCIÓN REPRESENTADA:**
Ing. Guillermo Realpe (Presidente)	FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
Sr. Carlos Aulestia	LAFARGE CEMENTOS S. A.
Ing. Carlos González	INTACO ECUADOR S. A.
Arq. Karla Balladares	INTACO ECUADOR S. A.
Ing. Patricio Torres	DICOPLAN CIA. LTDA
Ing. Marlon Valarezo	UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
Ing. Víctor Buri	HORMIGONES HÉRCULES S. A
Ing. Xavier Herrera	HORMIGONERA QUITO CIA. LTDA.
Sr. Franco Jaramillo	HORMIJAMA S. A.
Ing. Luisa Flores	CÁMARA DE LA PEQUEÑA Y MEDIANA EMPRESA DE PICHINCHA
Ing. Robinson Galarza	GALARAMI
Ing. Carlos Castillo (Prosecretario Técnico)	INSTITUTO ECUATORIANO DEL CEMENTO Y DEL HORMIGÓN. INECYC.

Otros trámites:

La Subsecretaría de la Calidad del Ministerio de Industrias y Productividad aprobó este proyecto de norma

Oficializada como: Voluntaria Por Resolución No. 13008 de 2013-02-05
Registro Oficial No. 907 de 2013-03-07

Instituto Ecuatoriano de Normalización, INEN - Baquerizo Moreno E8-29 y Av. 6 de Diciembre
Casilla 17-01-3999 - Telfs: (593 2)2 501885 al 2 501891 - Fax: (593 2) 2 567815
Dirección General: E-Mail:direccion@inen.gob.ec
Área Técnica de Normalización: E-Mail:normalizacion@inen.gob.ec
Área Técnica de Certificación: E-Mail:certificacion@inen.gob.ec
Área Técnica de Verificación: E-Mail:verificacion@inen.gob.ec
Área Técnica de Servicios Tecnológicos: E-Mail:inenlaboratorios@inen.gob.ec
Regional Guayas: E-Mail:inenguayas@inen.gob.ec
Regional Azuay: E-Mail:inencuenca@inen.gob.ec
Regional Chimborazo: E-Mail:inenriobamba@inen.gob.ec
URL:www.inen.gob.ec



INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN

Quito - Ecuador

NORMA TÉCNICA ECUATORIANA **NTE INEN 1 576:2011**

HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO. ELABORACIÓN Y CURADO EN OBRA DE ESPECÍMENES PARA ENSAYO.

Primera Edición

STANDARD PRACTICE FOR MAKING AND CURING CONCRETE TEST SPECIMENS IN THE FIELD.

First Edition

DESCRIPTORES: Hormigón, cemento hidráulico, ensayos.
CO 02.10-328
CDU: 669.97
CIIU: 3699
ICS: 91.100.30



Norma Técnica Ecuatoriana Voluntaria	HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO. ELABORACIÓN Y CURADO EN OBRA DE ESPECÍMENES PARA ENSAYO.	NTE INEN 1 576:2011 2011-01

1. OBJETO

1.1 Esta norma establece los procedimientos para elaborar y curar cilindros y vigas, tomados de muestras representativas de hormigón fresco, utilizado en la construcción de una obra.

2. ALCANCE

2.1 Esta norma proporciona requisitos normalizados para la elaboración, curado, protección y transporte de especímenes de hormigón, bajo condiciones de obra

2.2 Este procedimiento no es adecuado para elaborar especimenes de hormigón cuyo asentamiento no se pueda medir con el cono de Abrams o se requiera de tamaños o formas de especímenes diferentes a los indicados en esta norma.

2.3 Si los especímenes son elaborados y tienen un curado normalizado, como lo establece esta norma, los resultados de los ensayos de resistencia se utilizarán para cualquiera de los siguientes propósitos:

2.3.1 Aceptar los ensayos para la verificación de la resistencia especificada,

2.3.2 Verificar si la dosificación de una mezcla es la adecuada para cumplir con la resistencia, y

2.3.3 Control de calidad.

2.4 Si los especímenes son elaborados y tienen un curado de obra, como lo establece esta norma, los resultados de los ensayos de resistencia se utilizarán para cualquiera de los siguientes propósitos:

2.4.1 Determinar si la estructura está apta para ser puesta en servicio,

2.4.2 Comparar los resultados de ensayo de los especímenes con curado normalizado o con otros resultados de ensayos de diversos métodos de ensayo en campo,

2.4.3 Verificar el adecuado curado y protección del hormigón de la estructura, o

2.4.4 Determinar el tiempo requerido para la remoción de los puntales y encofrados.

3. DEFINICIONES

3.1 Para efectos de esta norma se adoptan las definiciones de la NTE INEN 694.

4. DISPOSICIONES GENERALES

4.1 El hormigón utilizado para moldear los especímenes debe ser muestreado después de que se hayan realizado en la obra, todos los ajustes a la dosificación de la mezcla, incluyendo la adición de agua de mezcla y los aditivos.

4.2 Esta norma no tiene el propósito de contemplar todo lo concerniente a seguridad, si es que hay algo asociado con su uso. Es responsabilidad del usuario de esta norma establecer prácticas apropiadamente saludables y seguras y determinar la aplicabilidad de las limitaciones reguladoras antes de su uso.

(Continúa)

DESCRIPTORES: Hormigón, cemento hidráulico, ensayos.

4.3 Advertencia. Las mezclas frescas de cemento hidráulico son cáusticas y pueden causar quemaduras químicas a la piel y tejidos bajo exposición prolongada.

4.4 El texto de esta norma hace referencia a notas en pie de página, las cuales proveen material explicativo. Estas notas no deben ser consideradas como requisitos de esta norma.

5. MÉTODO DE ENSAYO

5.1 Resumen. Al hormigón fresco, una vez realizados los ajustes necesarios, se lo muestrea y se determinan sus características físicas, siguiendo procedimientos normalizados. Seguidamente se toman muestras de hormigón en los moldes especificados para el proyecto, los que pueden ser cilindros o vigas, de acuerdo a los procedimientos que se indican en esta norma; la compactación puede ser ejecutada por varillado o por vibración según lo indicado en las especificaciones. A los especímenes se les proporciona el curado inicial y final normalizado o curado de obra, dependiendo del propósito de los resultados del ensayo de los especímenes.

5.2 Equipos

5.2.1 *Moldes, generalidades*. Los moldes para elaborar especímenes, así como las bisagras y seguros que estén en contacto con el hormigón, deben ser elaborados de: acero, hierro fundido u otro material no absorbente, no reactivo con el hormigón de cemento portland o cualquier otro cemento hidráulico. Los moldes deben mantener sus dimensiones y forma, bajo cualquier condición de uso; deben ser impermeables durante su uso, comprobándose por su capacidad para mantener el agua vertida en su interior. Las condiciones para los ensayos de estanqueidad están dadas en los métodos de ensayo de elongación, absorción y estanqueidad de la norma ASTM C 470. Se puede utilizar un sellante adecuado como grasa pesada, arcilla moldeable o cera microcristalina, cuando sea necesario prevenir la fuga de agua a través de las juntas. Se deben proveer los seguros necesarios para sujetar firmemente las bases a los moldes. Los moldes reutilizables deben ser cubiertos ligeramente en su interior, con aceite mineral o con un material desmoldante no reactivo, antes de su uso.

5.2.2 *Moldes para cilindros*. Los moldes para la elaboración de especímenes para ensayo de hormigón deben cumplir con los requisitos de la norma ASTM C 470.

5.2.3 *Moldes para vigas*. Los moldes para la elaboración de vigas deben tener la forma y dimensiones requeridas para producir los especímenes estipulados en el numeral 5.3.2. Las superficies interiores de los moldes deben ser lisas; los lados, el fondo y los bordes deben ser perpendiculares entre si, ser rectos y no presentar deformaciones. La variación máxima de la sección transversal nominal no debe exceder de 3 mm, para moldes con profundidad o ancho de 150 mm o más. Los moldes no deben producir especímenes con una longitud menor en 2 mm de la requerida en el numeral 5.3.2.

5.2.4 *Varilla de compactación*. Varilla de acero, recta, lisa y de sección circular, con un diámetro que cumpla los requisitos de la tabla 1. La longitud de la varilla de compactación debe ser de por lo menos 100 mm mayor que la profundidad del molde en el cual se está realizando la compactación, pero no mayor de 600 mm de longitud total (ver nota 1). La tolerancia en la longitud de la varilla de compactación es de 4 mm. La varilla debe tener el borde de compactación o ambos extremos redondeados, con una punta semiesférica del mismo diámetro de la varilla.

TABLA 1. Requisitos para el diámetro de la varilla de compactación

Diámetro del cilindro o ancho de la viga (mm)	Diámetro de la varilla (mm)
< 150	10 ± 2
≥ 150	16 ± 2

NOTA 1. Una varilla con longitud de 400 mm a 600 mm, cumple con los requisitos de esta y las siguientes normas: NTE INEN 1 578, ASTM C 138, ASTM C 173 y ASTM C 231.

(Continúa)

5.2.5 *Vibradores*. Se pueden utilizar vibradores internos, con una frecuencia de por lo menos 9 000 vibraciones por minuto (150 Hz) mientras el vibrador está operando en el hormigón. El diámetro de un vibrador redondo no debe ser mayor que un cuarto del diámetro del molde cilíndrico o un cuarto del ancho del molde de la viga. Vibradores de otras formas deben tener el perímetro equivalente a la circunferencia de un vibrador redondo apropiado. La longitud total del mango del vibrador y el elemento vibrante debe exceder la profundidad de la sección que se está vibrando en al menos 75 mm. La frecuencia del vibrador debe ser verificada periódicamente con un tacómetro con caña vibratoria u otro dispositivo adecuado (ver nota 2).

5.2.6 *Mazo*. Se debe utilizar un mazo con cabeza de caucho o cuero no tratado, con una masa de 0,6 kg ± 0,2 kg.

5.2.7 *Herramientas de colocación*. Deben ser de un tamaño suficientemente grande para que cada cantidad de hormigón obtenida del recipiente en el que se tomó la muestra, sea representativa y lo suficientemente pequeña para que el hormigón no se derrame durante la colocación en el molde. Para la colocación del hormigón en el molde para cilindros la herramienta aceptable es un cucharón. Para la colocación del hormigón en el molde para vigas, se permite el uso de una pala o de un cucharón.

5.2.8 *Herramientas para el terminado*. Deben ser una llana o una paleta.

5.2.9 *Equipo para medir asentamiento*. Debe cumplir con los requisitos de la NTE INEN 1 578.

5.2.10 *Recipiente para toma de muestras*. El recipiente debe ser una bandeja de metal de lámina gruesa, una carretilla o un tablero plano, limpio y no absorbente, de capacidad suficiente para permitir una fácil remezcla de toda la muestra con una pala o una paleta.

5.2.11 *Equipo para medir el contenido de aire*. Debe cumplir con los requisitos de las normas ASTM C 173 o ASTM C 231.

5.2.12 *Equipo para la medición de la temperatura*. Debe cumplir con los requisitos de la norma ASTM C 1 064.

5.3 Requisitos para el ensayo

5.3.1 *Cilindros*. Los especímenes para resistencia a compresión o a tracción diametral deben ser cilindros y el hormigón debe fraguar en posición vertical. El número y tamaño de los cilindros moldeados deben ser los indicados en las especificaciones de la obra o en la NTE INEN 1855-1 o NTE INEN 1855-2. Adicionalmente, la longitud debe ser el doble del diámetro y el diámetro del cilindro debe ser por lo menos 3 veces el tamaño máximo nominal del árido grueso. Cuando el tamaño máximo nominal del árido grueso supera los 50 mm, la muestra de hormigón debe ser tratada por tamizado húmedo a través del tamiz de 50 mm, como se describe en la NTE INEN 1 763. Para ensayos de aceptación de la resistencia a compresión especificada, los cilindros deben ser de 150 mm x 300 mm o de 100 mm x 200 mm.

5.3.2 *Vigas*. Los especímenes para resistencia a flexión deben ser vigas y el hormigón debe ser moldeado y fraguar en posición horizontal. El número de vigas moldeadas debe ser el indicado en las especificaciones de la obra o en la NTE INEN 1855-1 o NTE INEN 1855-2. La longitud debe ser por lo menos 50 mm mayor que tres veces la altura, respecto de cómo va a ser ensayada. La relación entre ancho y altura, respecto de cómo se moldea, no debe exceder de 1,5. La viga normalizada debe tener una sección transversal de 150 mm x 150 mm y debe ser utilizada para hormigón con árido grueso de hasta 50 mm de tamaño máximo nominal. Cuando el tamaño máximo nominal del árido grueso excede de 50 mm, la dimensión más pequeña de la sección transversal de la viga debe ser al menos tres veces el tamaño máximo nominal del árido grueso. A menos que las especificaciones del proyecto lo requieran, las vigas elaboradas en campo no deben tener el ancho o la altura menor que 150 mm.

NOTA 2. Para información del tamaño y la frecuencia de varios vibradores y el método de verificación periódica de la frecuencia, ver el ACI 309R.

(Continúa)

5.3.3 *Técnicos de campo*. Los ensayos de hormigón requeridos para determinar el cumplimiento de esta norma deben ser realizados por un Técnico en Ensayos de Campo del Hormigón, ACI - Grado I o con título certificado por una institución superior o equivalente. Los programas para certificación de personal para técnicos con certificación equivalente a la del ACI, deben incluir tanto exámenes escritos como prácticos, como se indica en el ACI CP-1.

5.4 Muestreo del hormigón

5.4.1 Las muestras utilizadas para elaborar especímenes de ensayo bajo esta norma, deben ser obtenidas de acuerdo con la NTE INEN 1 763, a menos que haya sido aprobado o especificado un procedimiento alternativo.

5.4.2 Registrar la identificación de la muestra con respecto a la ubicación en la que se coloca el hormigón que representa, la fecha y hora de moldeo.

5.5 Asentamiento, contenido de aire y temperatura (ver nota 3)

5.5.1 *Asentamiento*. Medir y registrar el asentamiento de cada amasada de hormigón, del cual se elaboran los especímenes, inmediatamente después de remezclar en el recipiente de muestreo, de acuerdo con la NTE INEN 1 578.

5.5.2 *Contenido de aire*. Determinar y registrar el contenido de aire de acuerdo con la norma ASTM C 173 o la norma ASTM C 231. El hormigón utilizado para determinar el contenido de aire no debe ser empleado para elaborar los especímenes de ensayo.

5.5.3 *Temperatura*. Determinar y registrar la temperatura de acuerdo con la norma ASTM C 1 064.

5.6 Procedimiento para el moldeo de especímenes

5.6.1 *Lugar para el muestreo*. Moldear los especímenes lo más rápido posible, sobre una superficie rígida y nivelada, libre de vibraciones y otras perturbaciones, en un lugar tan cercano como sea posible al lugar donde van a ser almacenados.

5.6.2 *Moldeo de cilindros*. Seleccionar la varilla de compactación adecuada según el numeral 5.2.4 y la tabla 1 o el vibrador apropiado según el numeral 5.2.5. De la tabla 2 determinar el método de compactación, a menos que otro método esté especificado. Si el método de compactación es por varillado, de la tabla 3 determinar los requisitos para el moldeo. Si el método de compactación es por vibración, de la tabla 4, determinar los requisitos para el moldeo. Seleccionar un cucharón del tamaño descrito en el numeral 5.2.7. Mientras se coloca el hormigón en el molde, mover el cucharón alrededor del perímetro de la abertura del molde para asegurar una distribución del hormigón con la mínima segregación. Cada capa de hormigón debe ser compactada según se requiera. Al colocar la última capa, adicionar una cantidad de hormigón para asegurar que, después de la compactación, el molde quede lleno.

5.6.3 *Moldeo de vigas*. Seleccionar la varilla de compactación adecuada según el numeral 5.2.4 y la tabla 1 o el vibrador apropiado según el numeral 5.2.5. De la tabla 2 determinar el método de compactación, a menos que otro método esté especificado. Si el método de compactación es por varillado, de la tabla 3 determinar los requisitos para el moldeo. Si el método de compactación es por vibración, de la tabla 4, determinar los requisitos para el moldeo. Determinar el número de golpes con la varilla por cada capa, uno por cada 14 cm² del área superficial de la viga. Seleccionar la herramienta de colocación según lo descrito en el numeral 5.2.7. Cuando se utilice el cucharón o la pala, colocar el hormigón en el molde hasta la altura requerida para cada capa, colocar el hormigón de tal forma que esté uniformemente distribuido en cada capa con la mínima segregación. Cada capa debe ser compactada según se requiera. Al colocar la última capa, adicionar una cantidad de hormigón para asegurar que, después de la compactación, el molde quede lleno.

NOTA 3. Algunas especificaciones pueden requerir la determinación de la masa unitaria del hormigón. En algunos proyectos se puede requerir el volumen de hormigón producido por cada amasada. También puede ser deseable información adicional sobre la medición del contenido de aire. Para la medición de la masa unitaria, rendimiento y contenido de aire por el método gravimétrico del hormigón fresco, se utilizan los procedimientos descritos en la norma ASTM C 138.

(Continúa)

TABLA 2. Requisitos para determinar el método de compactación

Asentamiento (mm)	Método de compactación
≥ 25 < 25	Varillado o vibración Vibración

TABLA 3. Requisitos para el moldeo mediante varillado

Tipo de espécimen y tamaño	Número de capas de aproximadamente igual altura	Número de golpes con la varilla por capa
Cilindros: Diámetro (mm) 100 150 225	 2 3 4	 25 25 50
Vigas: Ancho (mm) De 150 a 200 > 200	 2 3 o más capas de igual altura, cada una no debe exceder de 150 mm	 Ver numeral 5.6.3 Ver numeral 5.6.3

TABLA 4. Requisitos para el moldeo mediante vibración

Tipo de espécimen y tamaño	Número de capas	Número de inserciones del vibrador por capa	Altura aproximada por capa (mm)
Cilindros: Diámetro (mm) 100 150 225	 2 2 2	 1 2 4	La mitad de la altura del espécimen
Vigas: Ancho (mm) De 150 a 200 > 200	 1 2 o más	 Ver numeral 5.6.4.2 Ver numeral 5.6.4.2	 La altura del espécimen 200, lo más aproximado posible

5.6.4 *Compactación*. Los métodos de compactación especificados en esta norma son varillado o vibración interna.

5.6.4.1 *Varillado*. Colocar el hormigón en el molde, en el número de capas requeridas de aproximadamente igual volumen. Compactar cada capa uniformemente sobre la sección transversal con la punta redondeada de la varilla, con el número de golpes requerido. Compactar la capa del fondo, penetrando la varilla en toda su profundidad, en la compactación de esta capa tener cuidado de no dañar el fondo del molde. Para cada capa superior, permitir que la varilla penetre toda la capa que está siendo compactada e ingrese a la capa inferior aproximadamente 25 mm. Luego de que cada capa ha sido compactada, golpear en el exterior del molde de 10 a 15 veces con el mazo.

(Continúa)

Estos golpes tienen como único propósito cerrar cualquier agujero dejado por la varilla y eliminar cualquier burbuja grande de aire que hubiere sido atrapada. Para los moldes cilíndricos que sean susceptibles de daño si se golpean con el mazo, utilizar la mano abierta para golpear ligeramente. Después de golpear, igualar cada capa de hormigón a lo largo de los lados y bordes del molde de viga con una paleta u otra herramienta adecuada. Los moldes que no se han llenado, deben ser completados con hormigón representativo durante la compactación de la capa superior. En los moldes que tengan exceso de hormigón, este debe ser retirado.

5.6.4.2 *Vibración*. Mantener un tiempo de vibración uniforme para cada clase particular de hormigón, vibrador y tipo de molde involucrado. El tiempo de vibración requerido, depende de la trabajabilidad del hormigón y de la efectividad del vibrador, generalmente la vibración aplicada es suficiente cuando la superficie del hormigón se vuelve relativamente lisa y las burbujas grandes de aire dejan de aflorar en la superficie. Continuar vibrando solamente el tiempo suficiente para lograr una compactación adecuada del hormigón (ver nota 4). Llenar los moldes y vibrar en el número de capas requeridas de aproximadamente igual volumen. Colocar todo el hormigón para cada capa en el molde antes de empezar la vibración de esta capa. En la compactación del espécimen, insertar el vibrador lentamente y no permitir que este se apoye en el fondo o en los lados del molde, retirar el vibrador lentamente para evitar que grandes burbujas de aire queden dentro del espécimen. Al colocar la última capa, evitar el sobrellenado en más de 6 mm.

a) Cilindros. El número de inserciones del vibrador por capa está indicado en la tabla 4. Cuando se requiere más de una inserción por capa, distribuir de manera uniforme las inserciones dentro de cada capa. Permitir que el vibrador penetre a través de la capa a ser vibrada y en la capa inferior aproximadamente 25 mm. Después de que cada capa ha sido vibrada, golpear el exterior del molde por lo menos 10 veces con el mazo, para cerrar cualquier agujero remanente y liberar el aire atrapado. Utilizar la mano abierta para golpear moldes de cartón o metálicos de un solo uso, que son susceptibles de daño si se golpean con el mazo.

b) Vigas. Insertar el vibrador a intervalos que no excedan de 150 mm a lo largo de la línea central de la dimensión longitudinal del espécimen. Para especímenes más anchos que 150 mm, alternar las inserciones a lo largo de dos líneas. Permitir que el eje del vibrador penetre en la capa inferior, aproximadamente 25 mm. Después de que cada capa ha sido vibrada, golpear el exterior del molde por lo menos 10 veces con el mazo. Estos golpes tienen como único propósito cerrar cualquier agujero dejado por el vibrado y eliminar las burbujas de aire atrapado.

5.6.5 *Terminado*. Realizar todo el terminado con la mínima manipulación necesaria para producir una superficie plana, que esté nivelada con el borde superior del molde y que no tenga depresiones o proyecciones mayores de 3,3 mm.

5.6.5.1 *Cilindros*. Luego de la compactación, igualar y terminar la superficie superior con la varilla compactadora cuando la consistencia del hormigón lo permita o con una llana o paleta. Si se desea, colocar sobre la superficie del hormigón fresco una capa delgada de una pasta rígida de cemento hidráulico, permitiéndole que fragüe y cure con el espécimen, ver la sección de materiales para refrentado de la norma ASTM C 6I7.

5.6.5.2 *Vigas*. Luego de la compactación del hormigón, utilizar una llana o paleta para igualar la superficie superior con la tolerancia necesaria para producir una superficie plana y uniforme.

5.6.6 *Identificación*. Marcar los especímenes para su identificación y del hormigón que representan. Utilizar un método que no altere la superficie del hormigón, no se debe marcar en los elementos removibles del molde. Luego de retirar el molde, marcar los especímenes de ensayo para mantener su identificación.

5.7 Curado

5.7.1 *Curado normalizado*. Es el método de curado utilizado cuando los especímenes son elaborados y curados para los propósitos indicados en el numeral 2.2.

____

NOTA 4. Para un asentamiento mayor a 75 mm, generalmente no debe requerirse más de 5 segundos de vibración en cada inserción para una adecuada compactación del hormigón. Puede requerirse tiempos más largos para un asentamiento menor, pero el tiempo de vibración raramente excede de 10 segundos por inserción.

(Continúa)

5.7.1.1 *Almacenamiento*. Si los especímenes no pueden ser moldeados en el lugar donde recibirán el curado inicial, inmediatamente luego del terminado, mover los especímenes al lugar del curado inicial para su almacenamiento. La superficie sobre la que se almacenarán los especímenes debe estar nivelada dentro de 20 mm por metro. Si se mueven los cilindros elaborados en moldes de un solo uso, levantar y sostener los cilindros de la parte baja del molde con una paleta grande o un dispositivo similar. Si se daña la superficie durante el movimiento hacia el almacenamiento inicial, inmediatamente se debe dar un nuevo terminado.

5.7.1.2 *Curado inicial*. Inmediatamente después del moldeo y terminado, el espécimen debe ser almacenado por un período de hasta 48 horas a una temperatura entre 16 °C y 27 °C, en un ambiente que prevenga la perdida de humedad de los especímenes. Para mezclas de hormigón con una resistencia especificada de 40 MPa o mayor, la temperatura de curado inicial debe estar entre 20 °C y 26 °C. Se permite utilizar varios procedimientos capaces de mantener las condiciones de humedad y temperatura especificadas durante el periodo de curado inicial, se debe utilizar un procedimiento apropiado o una combinación de procedimientos (ver nota 5). Proteger todos los especímenes de los rayos directos del sol y de cualquier radiación calórica, si se utiliza. La temperatura de almacenamiento debe ser controlada utilizando dispositivos de calefacción y enfriamiento, según sea necesario. Registrar la temperatura utilizando un termómetro de máximas y mínimas. Si se utilizan moldes de cartón, proteger las superficies exteriores de los moldes de su contacto con paños húmedos o cualquier fuente de agua.

5.7.1.3 *Curado final*:

a) *Cilindros*. Una vez concluido el curado inicial y dentro de 30 minutos después de remover los especímenes de los moldes, curarlos a una temperatura de 23 °C ± 2 °C, manteniendo todo el tiempo sus superficies con agua libre, utilizando tanques de almacenamiento o cámaras de curado, que cumplan con los requisitos de la NTE INEN 2 528, excepto cuando se los refrente con mortero de azufre inmediatamente antes del ensayo. Cuando se refrenta con mortero de azufre, se deben secar las superficies superior e inferior del cilindro para prevenir la formación de paquetes de vapor o espuma mayores de 6 mm, debajo o dentro del refrentado, como se describe en la norma ASTM C 617. Para un periodo que no exceda de 3 horas inmediatamente antes del ensayo, no se requieren temperaturas de curado normalizado, a condición de que se mantenga en los cilindros la humedad libre y la temperatura ambiente esté entre 20 °C y 30 °C.

b) *Vigas*. Deben ser curadas de la misma forma que los cilindros (ver el literal a, del numeral 5.7.1.3) excepto que deben ser almacenadas en agua saturada con cal, a una temperatura de 23 °C ± 2 °C, por lo menos 20 horas antes de su ensayo. Debe prevenirse el secado de las superficies de la viga, desde la remoción del almacenamiento en agua, hasta el ensayo (ver nota 6).

5.7.2 *Curado de campo*. Es el método de curado utilizado para los especímenes elaborados y curados para los propósitos indicados en el numeral 2.4.

NOTA 5. Se puede crear un ambiente con humedad satisfactoria durante el periodo de curado inicial de los especímenes, mediante uno o más de los siguientes procedimientos: 1) sumergir inmediatamente los especímenes provistos con una tapa plástica, en agua saturada con cal, 2) almacenarlos en cajas de madera o estructuras apropiadamente construidas, 3) colocarlos en pozos de arena húmeda, 4) cubrirlos con tapas plásticas removibles, 5) colocarlos dentro de fundas plásticas o 6) cubrirlos con planchas plásticas o placas no absorbentes si se toman las precauciones para evitar el secado cuando se utiliza yute húmedo dentro del confinamiento, pero evitar que el yute esté en contacto con las superficies de hormigón. Se puede controlar una temperatura ambiente satisfactoria durante el curado inicial de los especímenes, mediante uno o más de los siguientes procedimientos: 1) utilizar ventilación, 2) utilizar hielo, 3) utilizar dispositivos de control de calentamiento o enfriamiento controlados por un termostato o 4) utilización de métodos de calefacción como estufas o bombillas. Se puede utilizar otros métodos adecuados, con tal que cumplan con los requisitos que limitan la temperatura de almacenamiento de los especímenes y la pérdida de humedad. Para mezclas de hormigón con resistencia especificada de 40 MPa o mayor, el calor generado en edades tempranas puede elevar la temperatura sobre los límites de almacenamiento requeridos. Un método fácil para mantener la temperatura requerida durante el almacenamiento puede ser la inmersión en agua saturada con cal con control de temperatura. Cuando los especímenes van a ser sumergidos en agua saturada con cal, no se deben utilizar especímenes en moldes de cartón u otros moldes que se expanden cuando se sumergen en agua. Los resultados de ensayos de resistencia a edades tempranas pueden ser menores cuando son almacenados a 16 °C y más altos cuando se los almacena a 27 °C. Para edades mayores, los resultados de los ensayos pueden ser menores para especímenes almacenados en temperaturas iniciales altas.

NOTA 6. Cantidades relativamente pequeñas de secado superficial, en los especímenes para ensayos a flexión, pueden inducir esfuerzos de tensión en las fibras extremas, que pueden producir una reducción importante de la resistencia a flexión.

(Continúa)

5.7.2.1 *Cilindros*. Almacenar los cilindros en o sobre la estructura, tan cerca como sea posible del sitio en que se colocó el hormigón al que representan. Proteger todas las superficies de los cilindros, de la forma más parecida posible a la manera como está protegida la estructura. Mantener a los cilindros con la misma temperatura y humedad ambiente de la estructura de la obra. Ensayar los especímenes en las condiciones de humedad resultantes del tratamiento de curado especificado. Para cumplir estas condiciones, los especímenes elaborados para determinar el tiempo en el que una estructura puede ser puesta en servicio deben retirarse del molde al mismo tiempo que se retiren los encofrados en la obra.

5.7.2.2 *Vigas*. Curar las vigas de la misma manera que el hormigón de la estructura, tanto como sea posible. Luego de 48 h ± 4 h después del moldeo, trasladar los especímenes al lugar de almacenamiento y retirarlos de los moldes. Almacenar los especímenes representativos de los pavimentos o losas sobre el suelo, colocándolos en el suelo en la misma posición como fueron moldeados, con la cara superior hacia arriba. Cubrir los lados y bordes laterales del espécimen con tierra o arena que debe permanecer húmeda, dejando las superficies superiores expuestas al tratamiento de curado especificado. Almacenar los especímenes que representan la estructura de hormigón lo más cercano posible al sitio de la estructura, cuyo hormigón representan y mantener las mismas condiciones de temperatura y humedad ambiente que en la estructura. Al final del período de curado, dejar los especímenes en el lugar expuestos a la intemperie de la misma manera que la estructura. Retirar todos los especímenes del almacenamiento en campo y almacenarlos en agua saturada con cal a 23 °C ± 2 °C por 24 h ± 4 h inme diatamente antes del ensayo, para asegurar condiciones uniformes de humedad entre especímenes. Observar las precauciones indicadas en el literal a, del numeral 5.7.1.3 para protegerlos contra el secado entre el tiempo de remoción del curado y el ensayo.

5.7.2.3 *Curado de hormigón estructural liviano.* Curar los cilindros de hormigón estructural liviano de acuerdo con la norma ASTM C 330.

5.8 Transporte de los especímenes al laboratorio. Antes del transporte, curar y proteger los especímenes como se indica en el numeral 5.7. Los especímenes no deben ser transportados dentro de las primeras 8 horas después del fraguado final (ver nota 7). Durante el transporte, proteger los especímenes con un material de amortiguación adecuado para prevenir daños por golpes. Durante el clima frío, proteger los especímenes de la congelación con un material aislante adecuado. Prevenir la pérdida de humedad durante el transporte, envolviéndolos en plástico, mantas húmedas, rodeándolos de arena húmeda o en moldes impermeables con tapas herméticas. El tiempo de transporte no debe exceder de 4 horas.

5.9 Informe. Remitir la siguiente información al laboratorio que va a ensayar los especímenes:

a) Identificación o código de identificación de cada espécimen,
b) Localización del hormigón representado por las muestras,
c) Fecha, hora y nombre del laboratorista que elaboró los especímenes e Identificación del responsable de los procesos de, curado y transporte de los especimenes al laboratorio
d) Asentamiento, contenido de aire y temperatura del hormigón, resultados de otros ensayos realizados en el hormigón fresco y cualquier desviación de los métodos de ensayo normalizados, y
e) Método de curado. Para el método de curado normalizado reportar: el método de curado inicial con la temperatura máxima y mínima y el método de curado final. Para el método de curado de campo reportar: la ubicación de almacenamiento de los especímenes, la forma de protección de los elementos, la temperatura y humedad ambiente y el tiempo en que fueron removidos de los moldes.

NOTA 7. El tiempo de fraguado puede ser medido de acuerdo con la norma ASTM C 403.

(Continúa)

APÉNDICE Z

Z.1 DOCUMENTOS NORMATIVOS A CONSULTAR

Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 694	*Hormigón y áridos para elaborar hormigón. Terminología*.
Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1 578	*Hormigón de cemento hidráulico. Determinación del asentamiento.*
Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1 763	*Hormigón de cemento hidráulico. Muestreo.*
Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2 528	*Cámaras de curado, gabinetes húmedos, tanques para almacenamiento en agua y cuartos para elaborar mezclas, utilizados en ensayos de cemento hidráulico y hormigón. Requisitos.*
Norma ASTM C 138	*Método de ensayo para determinar la densidad (masa unitaria), rendimiento y contenido de aire (gravimétrico) del hormigón.*
Norma ASTM C 173	*Método de ensayo para determinar el contenido de aire en el hormigón mezclado fresco, por el método volumétrico.*
Norma ASTM C 231	*Método de ensayo para determinar el contenido de aire en el hormigón mezclado fresco, por el método de presión*.
Norma ASTM C 330	*Especificaciones para áridos livianos para hormigón estructural*.
Norma ASTM C 403	*Método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado de mezclas de hormigón mediante resistencia a la penetración.*
Norma ASTM C 470	*Especificaciones para los moldes para la fabricación de cilindros para ensayo de hormigón verticales.*
Norma ASTM C 617	*Práctica para refrentar especímenes cilíndricos de hormigón.*
Norma ASTM C 1 064	*Método de ensayo para determinar la temperatura de mezclas frescas de hormigón de cemento hidráulico*.
ACI CP-1	*Técnico para ensayos de hormigón en campo. Grado I*
ACI 309R	*Guía para la compactación del hormigón.*

Z.2 BASE DE ESTUDIO

ASTM C 31 – 09. *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the field*. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, 2009.

INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA

Documento: NTE INEN 1 576	TÍTULO: HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO. ELABORACIÓN Y CURADO EN OBRA DE ESPECÍMENES PARA ENSAYO	Código: CO 02.10-328

ORIGINAL:	REVISIÓN:
Fecha de iniciación del estudio: 2010-05-03	Fecha de aprobación anterior del Consejo Directivo Oficialización con el Carácter de por Acuerdo Ministerial No. publicado en el Registro Oficial No. Fecha de iniciación del estudio:

Fechas de consulta pública: de a

Subcomité Técnico: HORMIGONES, ÁRIDOS Y MORTEROS
Fecha de iniciación: 2010-05-12 Fecha de aprobación: 2010-06-03
Integrantes del Subcomité Técnico:

NOMBRES:	INSTITUCIÓN REPRESENTADA:
Ing. Guillermo Realpe (Presidente)	FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
Ing. José Arce (Vicepresidente)	HORMIGONES HÉRCULES S. A.
Ing. Jaime Salvador	INSTITUTO ECUATORIANO DEL CEMENTO Y DEL HORMIGÓN. INECYC.
Ing. Raúl Ávila	ASOCIACIÓN DE PRODUCTORES DE HORMIGÓN PREMEZCLADO DEL ECUADOR. APRHOPEC.
Ing. Hugo Egüez	HOLCIM ECUADOR S. A. (AGREGADOS)
Ing. Raúl Cabrera	HOLCIM ECUADOR S. A. (HORMIGONES)
Sr. Carlos Aulestia	LAFARGE CEMENTOS S. A.
Ing. Xavier Arce	CÁMARA DE LA CONSTRUCCIÓN DE GUAYAQUIL.
Ing. Marlon Valarezo	UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
Arq. Soledad Moreno	INTACO ECUADOR S. A.
Ing. Carlos González	INTACO ECUADOR S. A.
Ing. Víctor Buri	HORMIGONES HÉRCULES S. A.
Ing. Douglas Alejandro	MUNICIPIO DE GUAYAQUIL.
Ing. Verónica Miranda	COLEGIO DE INGENIEROS CIVILES DE PICHINCHA / HORMIGONERA EQUINOCCIAL
Ing. Diana Sánchez	FACULTAD DE INGENIERÍA. PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR.
Ing. Stalin Serrano	HORMIGONERA EQUINOCCIAL.
Ing. Xavier Herrera	HORMIGONERA QUITO CIA. LTDA.
Dr. Juan José Recalde	CAMINOSCA CIA. LTDA.
Ing. Mireya Martínez	CAMINOSCA CIA. LTDA.
Ing. Rubén Vásquez	CEMENTO CHIMBORAZO C. A.
Ing. Víctor Luzuriaga	INDUSTRIAS GUAPÁN S. A.
Ing. Patricio Torres	DICOPLAN CIA. LTDA.
Ing. Luis Balarezo	CUERPO DE INGENIEROS DEL EJÉRCITO
Ing. Carlos Castillo (Prosecretario Técnico)	INSTITUTO ECUATORIANO DEL CEMENTO Y DEL HORMIGÓN. INECYC.

Otros trámites:

El Directorio del INEN aprobó este proyecto de norma en sesión de 2010-11-26

Oficializada como: Voluntaria Por Resolución No. 144-2010 de 2010-12-23
Registro Oficial No. 367 de 2011-01-20

Instituto Ecuatoriano de Normalización, INEN - Baquerizo Moreno E8-29 y Av. 6 de Diciembre
Casilla 17-01-3999 - Telfs: (593 2)2 501885 al 2 501891 - Fax: (593 2) 2 567815
Dirección General: E-Mail:direccion@inen.gob.ec
Área Técnica de Normalización: E-Mail:normalizacion@inen.gob.ec
Área Técnica de Certificación: E-Mail:certificacion@inen.gob.ec
Área Técnica de Verificación: E-Mail:verificacion@inen.gob.ec
Área Técnica de Servicios Tecnológicos: E-Mail:inencati@inen.gob.ec
Regional Guayas: E-Mail:inenguayas@inen.gob.ec
Regional Azuay: E-Mail:inencuenca@inen.gob.ec
Regional Chimborazo: E-Mail:inenriobamba@inen.gob.ec
URL:www.inen.gob.ec



INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN

Quito - Ecuador

NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 2 528:2010

CÁMARAS DE CURADO, GABINETES HÚMEDOS, TANQUES PARA ALMACENAMIENTO EN AGUA Y CUARTOS PARA ELABORAR MEZCLAS, UTILIZADOS EN ENSAYOS DE CEMENTO HIDRÁULICO Y HORMIGÓN. REQUISITOS.

Primera Edición

STANDARD SPECIFICATION FOR MIXING ROOMS, MOIST CABINETS, MOIST ROOMS, AND WATER STORAGE TANKS USED IN THE TESTING OF HYDRAULIC CEMENTS AND CONCRETES.

First Edition

DESCRIPTORES: Materiales de construcción y edificación, planificación física, otros edificios, cámaras de curado, gabinetes húmedos, tanques de almacenamiento en agua, cuartos de ensayo, requisitos.
FD 03.05-444
CDU: .006.2
CIIU: 8324
ICS: 91.040.99

Norma Técnica Ecuatoriana Voluntaria	CÁMARAS DE CURADO, GABINETES HÚMEDOS, TANQUES PARA ALMACENAMIENTO EN AGUA Y CUARTOS PARA ELABORAR MEZCLAS, UTILIZADOS EN ENSAYOS DE CEMENTO HIDRÁULICO Y HORMIGÓN. REQUISITOS.	NTE INEN 2 528:2010 2010-01

1. OBJETO

1.1 Esta norma establece los requisitos que deben cumplir las cámaras de curado, los gabinetes húmedos y los tanques con agua donde se almacenan los especímenes de pasta, mortero y hormigón, y los cuartos para elaborar mezclas donde se preparan los especímenes de pasta y mortero.

2. DISPOSICIONES GENERALES

2.1 Esta norma no tiene el propósito de contemplar todo lo concerniente a seguridad, si es que hay algo asociado con su uso. Es responsabilidad del usuario de esta norma establecer prácticas apropiadamente saludables y seguras y determinar la aplicabilidad de las limitaciones reguladoras antes de su uso.

3. DEFINICIONES

3.1 Para los efectos de esta norma se adoptan las siguientes definiciones:

3.1.1 *Cuarto para elaborar mezclas*. Cuarto con temperatura y humedad relativa controladas, donde se preparan los especímenes con pasta de cemento y mortero.

3.1.2 *Gabinete húmedo*. Instalación de moderadas dimensiones con compartimentos para almacenamiento en condiciones de temperatura y humedad relativa controladas.

3.1.3 *Cámara de curado.* Instalación para almacenamiento a la que se puede ingresar, con temperatura y humedad relativa controladas, comúnmente llamado cuarto de neblina, cuando se alcanza la humedad relativa requerida por atomización de agua.

4. EQUIPOS

4.1 Equipos para medición de temperaturas

4.1.1 *Aparato para medir la temperatura de referencia*. Utilizado para verificar el registro de la temperatura, debe tener una precisión y permitir una lectura de 0,5 °C. En el laboratorio debe estar disponible una copia del certificado o reporte, en el cual se verifique la precisión, (ver nota 1).

4.1.2 *Registrador de temperaturas.* Las temperaturas, con una precisión de 1 °C, deben ser registradas cada 15 minutos o menos. Los datos del registro deben ser evaluados por lo menos una vez cada semana. Se debe mantener en el laboratorio la documentación de estas evaluaciones de comprobación, que confirmen que los datos están dentro del rango de temperaturas requerido, con el nombre de la persona que realizó tales evaluaciones, (ver nota 2).

4.1.2.1 Se debe verificar el registrador de temperatura por lo menos cada seis meses o cuando exista duda de su precisión.

NOTA 1. Se puede utilizar el método del punto de congelación, descrito en la norma ASTM E 77, para garantizar que no se produzca ningún daño al termómetro de referencia durante el envío.

NOTA 2. Se satisface este requisito, con una lectura de la tabla de registros inicial y a diferentes fechas. Se debe ignorar los cambios breves en la temperatura, debido a las aperturas de las puertas.

(Continúa)

DESCRIPTORES: Materiales de construcción y edificación, planificación física, otros edificios, cámaras de curado, gabinetes húmedos, tanques de almacenamiento en agua, cuartos de ensayo, requisitos

4.1.2.2 Para gabinetes húmedos o cámaras de curado, colocar el equipo que mide la temperatura de referencia, en una posición legible, al aire, lo más cerca posible a la sonda que registra la temperatura. Mantener la puerta cerrada por lo menos 5 minutos antes de hacer las lecturas. Registrar las lecturas de temperatura tanto del sensor como del registrador de temperatura de referencia. Cuando tome estas lecturas, el registrador de temperatura de referencia debe permanecer en el gabinete húmedo o en la cámara de humedad y leer inmediatamente al abrir la puerta.

4.1.2.3 Para tanques de almacenamiento en agua, colocar el aparato medidor de temperatura de referencia en una posición legible en el agua, lo más cerca posible a la sonda que registra la temperatura. Sin retirar el aparato medidor de temperatura de referencia del agua, registrar las lecturas de temperatura tanto del sensor de temperatura como del aparato medidor de temperatura de referencia, luego de que la temperatura se ha estabilizado.

4.1.2.4 Verificar la precisión del registrador de temperatura, mediante la comparación de las lecturas de este equipo con el de referencia, durante la operación normal del gabinete húmedo, la cámara de curado o el tanque de almacenamiento en agua. Si la diferencia entre las lecturas de temperatura es mayor a 1 ℃, la temperatura del registrador, debe ser ajustada para estar dentro de 0,5 ℃ con respecto al aparato medidor de temperatura de referencia.

5. REQUISITOS

5.1 Requisitos específicos

5.1.1 *Requisitos para los cuartos para elaborar mezclas de cemento*

5.1.1.1 La temperatura del aire en las inmediaciones de la mesa de mezclado, moldes y placas base se deben mantener a 23,0 ℃ ± 4,0 ℃ y con una hume dad relativa no menor a 50%.

5.1.1.2 La temperatura del agua de mezcla utilizada para preparar los especímenes de pasta de cemento y mortero debe ser 23,0 ℃ ± 2,0 ℃.

5.1.2 *Requisitos para gabinetes húmedos y cámaras de curado*

5.1.2.1 *General.* El ambiente, en un gabinete húmedo o en una cámara de curado, debe tener una temperatura de 23,0 ℃ ± 2,0 ℃ y una humedad relat iva no menor a 95%. La humedad en el ambiente debe estar saturada hasta el grado necesario para asegurar que las superficies expuestas de todos los especímenes en almacenamiento, puedan verse húmedos y sentirse húmedos todo el tiempo. Todas las cámaras de curado como los gabinetes húmedos deben estar equipados con un registrador de temperatura. El uso de equipos para registro de humedad es opcional. Las repisas sobre las cuales se colocan los especímenes frescos, deben estar niveladas.

a) El aire en el gabinete húmedo o en la cámara de curado, debe estar cercano a la saturación, con suficiente humedad para proveer las condiciones de almacenamiento especificadas. En muchos casos, durante los periodos en que los especímenes están siendo colocados o retirados del almacenamiento, la saturación está por debajo de la óptima; en estos momentos obviamente inoportunos, no se deben hacer mediciones de la humedad relativa.

b) La temperatura al interior del gabinete húmedo o de la cámara de curado debe ser controlada con instalaciones hechas para el calentamiento o el enfriamiento o ambos según sea necesario. Esto se puede lograr por una de estas dos maneras:

   b.1) Controlar termostáticamente la temperatura del aire dentro del gabinete húmedo o la cámara de curado cuando la temperatura del espacio exterior no está acondicionada. En este caso el elemento sensor debe estar localizado al interior de la cámara de curado o del gabinete húmedo.

   b.2) Controlar termostáticamente la temperatura del aire que rodea al gabinete húmedo o la cámara de curado y ajustar manualmente la temperatura dentro de estos sitios.

(Continúa)

c) En cualquiera de los casos precedentes, el laboratorio debe demostrar la capacidad de control para mantener el requisito de temperatura en el gabinete húmedo o la cámara de curado, en un periodo de tiempo extendido. Como evidencia de esta capacidad, se debe requerir los datos del registro de temperaturas que indiquen que las mismas están dentro de los límites especificados en el numeral 5.1.2.1.

5.1.2.2 *Gabinetes húmedos*. Un gabinete húmedo debe ser construido con materiales durables y las puertas deben ser de ajuste hermético. Se debe mantener la humedad relativa especificada mediante el uso de uno o más generadores de neblina, pulverizadores de agua o cortinas de agua sobre las paredes interiores que estén diseñados de manera que la descarga se recoja en una piscina que está, en o cerca del fondo de la sección de almacenamiento húmedo.

5.1.2.3 *Cámaras de curado*:

a) *General*. Las paredes de una cámara de curado deben ser construidas de material durable y todas las aberturas deben estar provistas de puertas o ventanas de ajuste hermético, (ver nota 3). Se puede mantener la humedad relativa especificada de cualquier manera conveniente y adecuada, (ver nota 4).

b) *Cámaras de curado utilizadas en ensayos de cemento*. Estas deben disponer de una estantería durable que se encuentre debidamente protegida para evitar que el goteo de agua caiga sobre la superficie de los especímenes frescos, recién moldeados.

c) *Cámaras de curado utilizadas en ensayos de hormigón.* Las condiciones ambientales internas deben ser tales que los especímenes de ensayo en almacenamiento, deben mantener en todo momento agua libre, en la totalidad de su superficie. Los especímenes no deben estar expuestos a goteos ni a agua corriente.

5.1.3 *Requisitos para tanques para almacenamiento en agua.*

5.1.3.1 *General*. Los tanques deben ser construidos de materiales no corrosibles. En los tanques que estén ubicados en áreas que no tengan temperatura controlada dentro del rango de 23,0 °C ± 2,0 °C, se deben realizar instalaciones para el control automático de temperatura del agua en ese rango, al igual que en cualquier otro caso que se experimente dificultad de mantener la temperatura dentro del rango especificado. Con la excepción de tanques de almacenamiento en agua localizados en una cámara de curado o en un gabinete húmedo, todos los tanques de almacenamiento en agua, deben estar equipados con un registrador de temperatura, con su elemento sensor en el agua de almacenamiento. Para efectos del registro de la temperatura, se puede considerar como un solo tanque a un grupo de tanques de almacenamiento en agua, si se cumplen las siguientes condiciones: (1) todos los tanques deben estar interconectados con tubería que permita que el agua fluya entre ellos, (2) los tanques estén provistos de algunos medios de circulación entre ellos y (3) en el control y registro semanal, la variación de temperatura entre los tanques no debe ser superior a 1,0 °C. El agua en un tanque de almacenamiento debe estar saturada con cal para prevenir la lixiviación del hidróxido de calcio de los especímenes, (ver nota 5). El agua no saturada con cal (cal hidratada de alto contenido de calcio) puede afectar a los resultados de los ensayos debido a la lixiviación de la cal de los especímenes de ensayo y no se debe utilizar en los tanques de almacenamiento. Para mantener la saturación con cal, debe estar presente un exceso de hidróxido de calcio. Para los efectos de la saturación con cal para evitar la lixiviación, la cal significa cal hidratada con alto contenido de calcio, no carbonato de calcio (piedra caliza), ver la norma de terminología de cal NTE INEN 252. El agua en el tanque de almacenamiento debe ser completamente agitada en intervalos que no excedan de un mes, para ayudar a reemplazar los iones de calcio que se han agotado. Se debe limpiar los tanques y rellenar con agua conteniendo 3 g/l de cal (hidróxido de calcio) a intervalos que no excedan de 24 meses, (ver nota 6).

NOTA 3. Las paredes bien aisladas pueden ayudar sustancialmente a mantener las condiciones necesarias.

NOTA 4. Un generador de neblina adecuado para este propósito, se lo muestra en la figura 1 del Anexo A.

NOTA 5. El pH no es un indicador fiable de la saturación de cal en el tanque de almacenamiento en agua, puesto que pueden ocurrir severas reducciones de los iones de calcio disueltos, antes de que los valores de pH se reduzcan significativamente.

NOTA 6. El valor de 3 g/l, está destinado a proporcionar una cantidad de cal (hidróxido de calcio), aproximadamente dos veces mayor que la requerida para la saturación inicial.

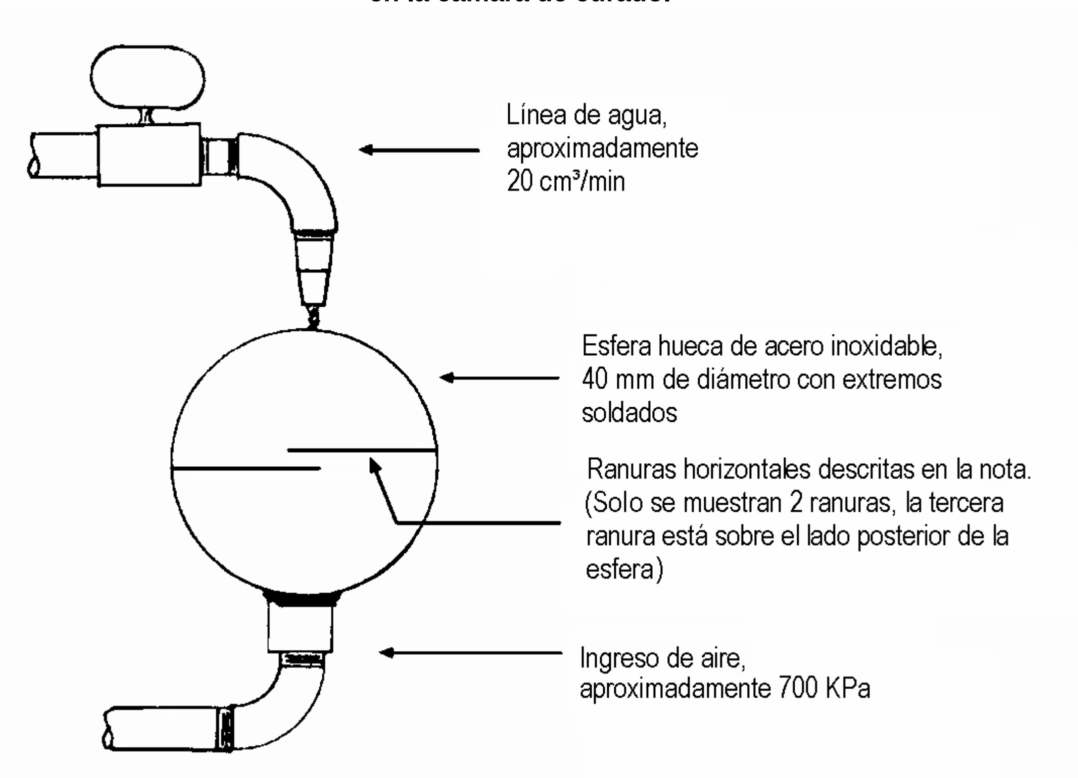
(Continúa)

5.1.3.2 No utilizar agua fresca corriendo continuamente o agua desmineralizada en los tanques de almacenamiento, ya que puede afectar los resultados de los ensayos debido a la excesiva lixiviación. Se puede utilizar un sistema cerrado, que circule el agua saturada con cal entre los tanques de almacenamiento.

(Continúa)

ANEXO A

FIGURA 1. Ejemplo de un pulverizador para generar neblina para mantener la humedad relativa en la cámara de curado.



NOTA A.1. Usando una sierra de diamante para mármol de 0,20 mm de espesor, cortar tres ranuras horizontales que abarquen de 120 ° a 150 ° alrededor de la circunfer encia de la esfera hueca, para paso de aire a una distancia de 5 mm entre ellas, aproximadamente. El aire pasa a través de estas ranuras arrastrando el agua (que fluye sobre la superficie exterior de la esfera) para producir nebulización.

(Continúa)

APÉNDICE Z

Z.1 DOCUMENTOS NORMATIVOS A CONSULTAR

Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 252	*Cales. Definición y clasificación*.
Norma ASTM E 77	*Método de ensayo para la inspección y verificación de termómetros*.

Z.2 BASE DE ESTUDIO

ASTM C 511 – 06. *Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes*. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, 2006.

INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA

Documento:	TÍTULO:	Código:
NTE INEN 2 528	CÁMARAS DE CURADO, GABINETES HÚMEDOS, TANQUES PARA ALMACENAMIENTO EN AGUA Y CUARTOS PARA ELABORAR MEZCLAS, UTILIZADOS EN ENSAYOS DE CEMENTO HIDRÁULICO Y HORMIGÓN. REQUISITOS	FD 03.05-444

ORIGINAL:	REVISIÓN:
Fecha de iniciación del estudio: 2009-06-15	Fecha de aprobación anterior del Consejo Directivo Oficialización con el Carácter de por Acuerdo Ministerial No. publicado en el Registro Oficial No. Fecha de iniciación del estudio:

Fechas de consulta pública: de a

Subcomité Técnico: Cementos
Fecha de iniciación: 2009-06-25 Fecha de aprobación: 2009-07-03
Integrantes del Subcomité Técnico:

NOMBRES:	INSTITUCIÓN REPRESENTADA:
Ing. Raúl Camaniero (Presidente)	FACULTAD DE INGENIERÍA. UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR.
Ing. Jaime Salvador	INSTITUTO ECUATORIANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO - INECYC
Arq. Soledad Moreno	INTACO ECUADOR S.A.
Ing. Carlos Ronquillo	HOLCIM ECUADOR S.A. (CEMENTOS)
Ing. Patricia Moreno	HOLCIM ECUADOR S.A. (CEMENTOS)
Ing. Hugo Egüez	HOLCIM ECUADOR S.A. (AGREGADOS)
Sr. Carlos Aulestia	LAFARGE CEMENTOS S.A.
Ing. Patricio Ruiz	INDUSTRIAS GUAPÁN S.A.
Ing. Rubén Vásquez	CEMENTO CHIMBORAZO C.A.
Ing. Raúl Ávila	HORMIGONES HÉRCULES S.A.
Ing. Washington Benavides	FACULTAD DE INGENIERÍA. UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR.
Ing. Guillermo Realpe	FACULTAD DE INGENIERÍA. PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR.
Ing. Verónica Miranda	HORMIGONERA EQUINOCCIAL
Ing. Carlos Proaño	MIDUVI
Ing. Xavier Herrera	HORMIGONERA QUITO CIA. LTDA.
Ing. Patricio Villena	CÁMARA DE LA CONSTRUCCIÓN DE QUITO
Ing. Carlos Castillo (Pro Secretario Técnico)	INSTITUTO ECUATORIANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO - INECYC .

Otros trámites:

El Directorio del INEN aprobó este proyecto de norma en sesión de 2009-11-27

Oficializada como: Voluntaria Por Resolución No. 138-2009 de 2009-12-22
Registro Oficial No. 117 de 2010-01-27

Instituto Ecuatoriano de Normalización, INEN - Baquerizo Moreno E8-29 y Av. 6 de Diciembre
Casilla 17-01-3999 - Telfs: (593 2)2 501885 al 2 501891 - Fax: (593 2) 2 567815
Dirección General: E-Mail:direccion@inen.gov.ec
Área Técnica de Normalización: E-Mail:normalizacion@inen.gov.ec
Área Técnica de Certificación: E-Mail:certificacion@inen.gov.ec
Área Técnica de Verificación: E-Mail:verificacion@inen.gov.ec
Área Técnica de Servicios Tecnológicos: E-Mail:inencati@inen.gov.ec
Regional Guayas: E-Mail:inenguayas@inen.gov.ec
Regional Azuay: E-Mail:inencuenca@inen.gov.ec
Regional Chimborazo: E-Mail:inenriobamba@inen.gov.ec
URL:www.inen.gov.ec



INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN

Quito - Ecuador

NORMA TÉCNICA ECUATORIANA **NTE INEN 1 573:2010**
Primera revisión

HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO.

Primera Edición

STANDARD TEST METHOD FOR COMPRESSIVE STRENGTH OF CYLINDRICAL CONCRETE SPECIMENS.

First Edition

DESCRIPTORES: Materiales de construcción y edificación, materiales y productos minerales, áridos para hormigón, contenido de arcilla, ensayo .
CO 02.10-301
CDU: 691.32:620.173
CIIU: 3699
ICS: 91.100.30

Norma Técnica Ecuatoriana Voluntaria	HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO.	NTE INEN 1 573:2010 Primera revisión 2010-06

1. OBJETO

1.1 Esta norma establece el método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico.

2. ALCANCE

2.1 Este método de ensayo se aplica a especímenes cilíndricos tales como cilindros moldeados y núcleos perforados de hormigón de cemento hidráulico, que tengan una densidad mayor que 800 kg/m^3.

2.2 Este método de ensayo se utiliza para determinar la resistencia a compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico, preparados y curados de acuerdo con las normas ASTM C 31, ASTM C 192, ASTM C 617, ASTM C 1 231, ASTM C 42 y ASTM C 873, mientras no existan normas INEN.

2.3 Los resultados de este método de ensayo se utilizan como base para: control de calidad de la dosificación del hormigón, operaciones de mezclado y colocación; determinación del cumplimiento con las especificaciones, control para evaluación de la efectividad de aditivos y usos similares.

3. DISPOSICIONES GENERALES

3.1 Se debe tener cuidado en la interpretación del significado de la determinación de la resistencia a la compresión con los procedimientos de este método de ensayo, puesto que la resistencia no es una propiedad fundamental o intrínseca del hormigón elaborado con materiales dados. Los valores obtenidos dependerán del tamaño y la forma del espécimen, dosificación, procedimientos de mezclado, métodos de muestreo, moldeado o fabricación y de la edad, temperatura y condiciones de humedad durante el curado

3.2 El texto de esta norma hace referencia a notas en pie de página, las cuales proveen material explicativo y no deben ser consideradas como requisitos de esta norma.

3.3 Esta norma no tiene el propósito de contemplar todo lo concerniente a seguridad, si es que hay algo asociado con su uso. Es responsabilidad del usuario de esta norma establecer prácticas apropiadamente saludables y seguras y determinar la aplicabilidad de las limitaciones reguladoras antes de su uso.

3.4 La persona que ensaye los cilindros para aceptación del hormigón, debe cumplir con los requisitos de técnico de laboratorio de hormigón de la norma ASTM C 1 077 y aprobar un examen que demuestre su desempeño, el cual es evaluado por un instituto superior o equivalente (ver nota 1).

3.5 Advertencia. Se debe proveer de los medios para detener los fragmentos de hormigón durante la rotura explosiva de especímenes. La tendencia a una rotura explosiva se incrementa con el aumento de la resistencia del hormigón y es más probable cuando la máquina de ensayo es relativamente flexible. Se recomiendan las precauciones de seguridad dadas en el Manual of Aggregate and Concrete Testing de la ASTM.

____

NOTA 1. Se puede cumplir con este requisito, con una certificación equivalente a la de Técnico de Resistencia de Hormigón del ACI.

(Continúa)

DESCRIPTORES: Materiales de construcción y edificación, materiales y productos minerales, áridos para hormigón, contenido de arcilla, ensayo.

4. MÉTODO DE ENSAYO

4.1 Resumen. Este método de ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a los cilindros moldeados o núcleos de hormigón de cemento hidráulico a una velocidad que se encuentra dentro de un rango definido hasta que ocurra la falla del espécimen. La resistencia a la compresión de un espécimen se calcula dividiendo la carga máxima alcanzada durante el ensayo para el área de la sección transversal del espécimen.

4.2 Equipos

4.2.1 *Máquina de ensayo*. La máquina de ensayo debe tener suficiente capacidad y disponer de las velocidades de carga descritas en el numeral 4.4.5.

4.2.1.1 Se debe verificar la calibración de las máquinas de ensayo, de acuerdo con la norma ASTM E 4, excepto en la verificación de rangos de carga requeridos en numeral 4.2.3. La verificación debe realizarse:

a) Por lo menos una vez al año, sin exceder los 13 meses,

b) En la instalación inicial o inmediatamente después de un traslado,

c) Inmediatamente después de efectuar reparaciones o ajustes que afecten la operación del sistema de aplicación de fuerza o los valores mostrados en el sistema de indicación de carga, excepto en los ajustes a cero que es compensado por la masa de los bloques de carga o probetas, o ambos, o

d) Cada vez que exista una razón para sospechar de la precisión de las cargas indicadas.

4.2.1.2 *Diseño.* El diseño de la máquina debe incluir las siguientes características:

a) La máquina debe ser operada con energía eléctrica y debe aplicar la carga continuamente, no de forma intermitente y sin producir impacto. Si esta solo tiene una velocidad de carga (cumpliendo los requisitos del numeral 4.4.5), debe estar provista con un medio suplementario para aplicar la carga a una velocidad que pueda ser verificada. Este medio suplementario de carga puede ser operado con energía eléctrica o manualmente.

b) El espacio provisto para los especímenes de ensayo debe ser lo suficientemente grande para acomodar, en una posición que permita leer y operar, un equipo de calibración elástico que tenga suficiente capacidad para cubrir el rango de carga potencial de la máquina de ensayo y que cumpla con los requisitos de la norma ASTM E 74 (ver nota2).

4.2.1.3 *Precisión.* La precisión de la máquina de ensayo debe cumplir con las siguientes disposiciones:

a) El porcentaje de error para las cargas dentro del rango de uso propuesto para la máquina de ensayo, no debe exceder de ± 1,0% de la carga indicada.

b) Se debe verificar la precisión de la máquina de ensayo aplicando cinco ensayos de carga en orden ascendente, en cuatro incrementos aproximadamente iguales. La diferencia entre dos ensayos de carga sucesivos cualquiera, no debe exceder de un tercio de la diferencia entre las cargas de ensayos máxima y mínima.

c) La carga indicada por la máquina de ensayo y la carga aplicada determinada a partir de las lecturas del equipo de verificación deben ser registradas en cada punto del ensayo. Calcular el error, E, y el porcentaje de error, E_p, para cada punto de la siguiente manera:

$$E = A - B \qquad (1)$$

$$E_p = 100\,(A - B)/B$$

NOTA 2. Los tipos de equipo de calibración elásticos generalmente disponibles y más comúnmente utilizados para este propósito son los anillos circulares de calibración o las celdas de carga.

(Continúa)

Donde:

A = carga indicada por la máquina que es verificada (kN), y
B = la carga aplicada determinada por el equipo de calibración (kN)

d) El informe sobre la verificación de una máquina de ensayo debe establecer el rango de carga dentro del cual cumple con los requisitos de la norma, en lugar de informar una aceptación o un rechazo generales. En ningún caso se debe declarar el rango de carga incluyendo cargas por debajo del valor 100 veces más pequeño que la carga estimable en el mecanismo indicador de carga de la máquina de ensayo o cargas dentro de la porción del rango por debajo del 10% de la capacidad máxima del rango.

e) En ningún caso debe ser declarado el rango de carga incluyendo cargas fuera del rango de las cargas aplicadas durante el ensayo de verificación.

f) No se debe corregir la carga indicada por una máquina de ensayo ni por cálculos ni por el uso de un diagrama de calibración para obtener valores dentro de la variación admisible requerida.

4.2.2 La máquina de ensayo debe estar equipada con dos bloques de carga de acero con caras endurecidas (ver nota 3), uno de los cuales es un bloque esférico que se apoya sobre la superficie superior del espécimen y el otro es un bloque sólido sobre el cual se asienta el espécimen. Las caras de contacto de los bloques de carga deben tener una dimensión mínima de al menos 3% mayor que el diámetro del espécimen a ser ensayado. Excepto para los círculos concéntricos descritos abajo, las caras de apoyo de los bloques con diámetro de 150 mm o mayor, no deben desviarse de la condición de plano por más de 0,02 mm a lo largo de los 150 mm o por más de 0,02 mm en el diámetro de cualquier bloque más pequeño y los bloques nuevos deben ser fabricados con la mitad de esta tolerancia. Cuando el diámetro de la cara del bloque de carga esférico excede el diámetro del espécimen por más de 13 mm, deben estar inscritos círculos concéntricos de no más de 0,8 mm de profundidad y no más de 1 mm de ancho, para facilitar un centrado adecuado.

4.2.2.1 Los bloques de carga inferior deben cumplir los siguientes requisitos:

a) El bloque de carga inferior está especificado con el objetivo de proveer una superficie que se la pueda maquinar fácilmente para realizar el mantenimiento de las condiciones de superficie especificadas (ver nota 4). Las superficies superior e inferior deben ser paralelas entre sí. Si la máquina de ensayo está diseñada de manera que la platina se mantenga fácilmente por sí sola en la condición especificada para la superficie, no se requiere un bloque inferior. Su dimensión horizontal mínima debe ser por lo menos 3% mayor que el diámetro del espécimen a ser ensayado. Los círculos concéntricos descritos en el numeral 4.2.2 son opcionales en el bloque inferior.

b) El centrado final del espécimen debe ser realizado con respecto al bloque esférico superior. Cuando se utiliza el bloque de carga inferior para ayudar en el centrado, el centro de los círculos concéntricos, cuando existan, o el centro del bloque en sí mismo debe estar directamente debajo del centro de la cabeza esférica. Se deben tomar precauciones respecto a la platina de la máquina para asegurar tal posición.

c) El bloque de carga inferior, cuando es nuevo, debe tener un espesor de al menos 25 mm y después de cualquier operación de maquinado, un espesor de al menos 22,5 mm.

4.2.2.2 El bloque de carga esférico debe cumplir los siguientes requisitos:

a) El diámetro máximo de la cara de contacto del bloque esférico de carga suspendido no debe exceder los valores de la tabla 1 (ver nota 5).

NOTA 3. Es conveniente que las caras de carga de los bloques utilizados para el ensayo de compresión del hormigón, posean una dureza Rockwell mayor o igual a HRC 55.

NOTA 4. El bloque puede ser asegurado a la platina de la máquina de ensayo.

NOTA 5. Se permiten las caras de contacto cuadradas, si el diámetro del círculo inscrito más grande posible no excede los diámetros de la tabla 1.

(Continúa)

TABLA 1. Diámetro máximo de la cara de contacto del bloque de carga esférico

Diámetro de los especímenes de ensayo (mm)	Diámetro máximo de la cara de contacto (mm)
50	105
75	130
100	165
150	255
200	280

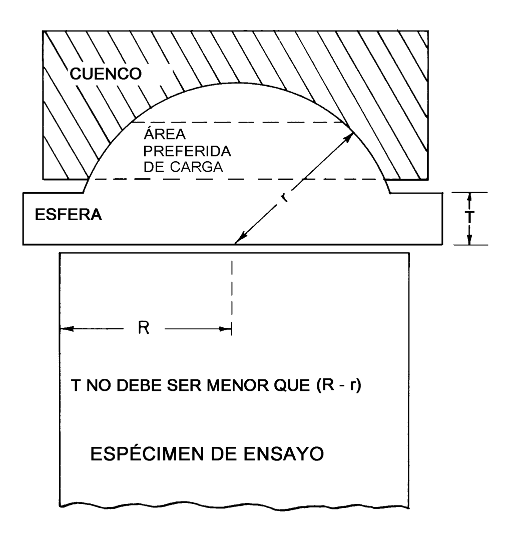
b) El centro de la esfera debe coincidir con la superficie de la cara de contacto dentro de una tolerancia de ± 5% del radio de la esfera. El diámetro de la esfera debe ser al menos el 75% del diámetro del espécimen a ser ensayado.

c) La esfera y el cuenco deben ser diseñados de tal manera que el acero, en el área de contacto, no los deformen permanentemente cuando sea cargada a la capacidad de la máquina de ensayo (ver nota 6).

d) Las superficies curvas del cuenco y de la parte esférica, se deben mantener limpias y lubricadas con un aceite en base de petróleo como el aceite convencional para motores y no con grasa de presión. No es conveniente que después del contacto con el espécimen y de la aplicación de una pequeña carga inicial, exista una inclinación en el bloque de carga esférico.

e) Si el radio de la esfera es más pequeño que el radio del espécimen más grande a ser ensayado, la parte de la cara de contacto que se extiende más allá de la esfera debe tener un espesor no menor que la diferencia entre el radio de la esfera y el radio del espécimen. La dimensión mínima de la cara de contacto debe ser al menos tan grande como el diámetro de la esfera (ver figura 1).

FIGURA 1. Gráfico de un bloque de carga esférico típico



NOTA. Se deben tomar precauciones para mantener la esfera en el cuenco y para mantener la unidad entera en la máquina de ensayo

f) La parte móvil del bloque de carga, se debe mantener ajustada al apoyo esférico, pero el diseño debe ser tal que la cara de contacto pueda rotar libremente e inclinarse al menos 4° en cualquier dirección.

NOTA 6. El área de contacto más favorable es en forma de aro (descrita como área de “carga” preferida) como se muestra en la figura 1.

(Continúa)

g) Si la parte del bloque de carga superior donde va la esfera está diseñada con dos piezas, compuesto de una parte esférica y una placa de carga, este debe estar provisto de un mecanismo que asegure que la parte esférica esté fija y centrada sobre la placa de carga.

4.2.3 *Indicador de carga:*

4.2.3.1 Si la carga aplicada por la máquina de compresión es registrada en un dial, el dial debe tener una escala graduada que pueda ser leída al menos, al 0,1% más cercano de la carga total de la escala (ver nota 7). El dial debe ser legible dentro del 1% de la carga indicada a cualquier nivel de carga dada, dentro del rango de carga. En ningún caso, el rango de cargas de un dial debe ser considerado para incluir cargas bajo un valor 100 veces el más pequeño cambio de carga que pueda ser leído en la escala. La escala debe estar provista con una línea de graduación que señale el cero y así numerada. El puntero del dial debe ser de suficiente longitud para alcanzar las marcas de graduación; el ancho del extremo del puntero no debe exceder la distancia libre entre las graduaciones más pequeñas. Cada dial debe estar equipado con un ajuste a cero que sea fácilmente accesible desde el exterior de la caja del dial y con un dispositivo adecuado que en todo momento, hasta que sea encerado, indique la carga máxima aplicada al espécimen con una precisión dentro del 1%.

4.2.3.2 Si la carga de la máquina de ensayo es indicada en forma digital, el visor numérico debe ser lo suficientemente grande para ser leído fácilmente. El incremento numérico debe ser igual o menor que el 0,10% de la carga total de la escala de un rango de cargas dado. En ningún caso, el rango de cargas verificado debe incluir cargas menores que el menor incremento numérico multiplicado por 100. La precisión de la carga indicada debe estar dentro del 1,0% de cualquier valor visualizado dentro del rango de carga verificado. Se debe tomar precauciones para hacer los ajustes que indiquen el verdadero cero a una carga cero. Debe estar provisto de un indicador de carga máxima que en todo momento, hasta que sea encerado, indique la carga máxima aplicada al espécimen dentro del 1% de la precisión del sistema.

4.3 Especímenes

4.3.1 Los especímenes no deben ser ensayados si cualquier diámetro individual de un cilindro difiere de cualquier otro diámetro del mismo cilindro en más del 2% (ver nota 8).

4.3.2 Antes de ser ensayados, ningún extremo de los especímenes de ensayo debe apartarse de la perpendicularidad a los ejes en más de 0,5° (aproxi madamente equivalente 1 mm en 100 mm). Los extremos de los especímenes para ensayo de compresión que no estén planos dentro de 0,050 mm deben ser cortados o limados para cumplir esta tolerancia o se deben refrentar con mortero de azufre de acuerdo con la norma ASTM C 617 o, cuando se permita, con la norma ASTM C 1 231. El diámetro utilizado para calcular el área de la sección transversal del espécimen de ensayo debe determinarse con una aproximación de 0,25 mm promediando dos diámetros medidos alrededor de la altura media del espécimen y que formen ángulos rectos entre sí.

4.3.3 Se permite reducir el número de cilindros individuales medidos para determinación del diámetro promedio, a uno por cada diez especímenes o tres especímenes por día, el que sea mayor, si se conoce que todos los cilindros han sido fabricados de un solo lote de moldes reusables o moldes para un solo uso, que siempre producen especímenes de diámetros promedio dentro de un rango de 0,5 mm. Cuando los diámetros promedio no caen dentro del rango de 0,5 mm o cuando los cilindros no están fabricados de un solo lote de moldes, el diámetro de cada cilindro ensayado debe ser medido y este valor utilizado en el cálculo de la resistencia a la compresión unitaria de ese espécimen.

NOTA 7. Se considera que lo más preciso que se puede leer es 0,5 mm a lo largo del arco descrito por el extremo de la aguja. También lo más cerca que se puede leer razonablemente, cuando el espaciamiento del mecanismo indicador de carga está entre 1 mm y 2 mm, es alrededor de la mitad del intervalo de la escala. Cuando el espaciamiento está entre 2 mm y 3 mm, un tercio del intervalo de carga puede ser leído con razonable certeza. Cuando el espaciamiento es 3 mm o más, un cuarto del intervalo de carga puede ser leído con razonable certeza.

NOTA 8. Esto puede ocurrir cuando los moldes que son para un solo uso se dañan o deforman durante el envío, cuando los moldes flexibles que son para un solo uso se deforman durante el moldeo o cuando un extractor de núcleos se desplaza o desvía durante la perforación.

(Continúa)

4.3.4 Si el usuario de los servicios de ensayo solicita la medición de la densidad de los especímenes de ensayo, se debe retirar cualquier humedad superficial mediante una toalla para luego determinar la masa de los especímenes antes del refrentado. Determinar la masa del espécimen utilizando una balanza que tenga una precisión dentro del 0,3% de la masa que está siendo medida. Medir la longitud del espécimen con una precisión de 1 mm en tres posiciones espaciadas regularmente alrededor de la circunferencia. Calcular la longitud promedio y registrarla con una precisión de 1 mm. Alternativamente, determinar la densidad del cilindro registrando la masa del cilindro en el aire y luego, sumergido en el agua a 23,0 °C ± 2,0 °C y calcular el volumen de acuerdo al numeral 4.5.3.1.

4.3.5 Cuando no se requiere la determinación de la densidad y la relación de la longitud al diámetro es menor que 1,8 o mayor que 2,2, medir la longitud del espécimen con una aproximación de 0,05 D.

4.4 Procedimiento

4.4.1 Se deben realizar los ensayos de compresión de especímenes curados en húmedo, tan pronto como sea posible luego de extraerlos del almacenamiento húmedo.

4.4.2 Los especímenes deben ser ensayados en condición húmeda. Se deben mantener húmedos utilizando cualquier método conveniente durante el período comprendido entre la remoción del almacenamiento húmedo y el ensayo.

4.4.3 Todos los especímenes de ensayo para una edad de ensayo dada, deben romperse dentro de las tolerancias de tiempo admisibles, señaladas en la tabla 2:

TABLA 2. Tolerancia de tiempo admisible para el ensayo de especímenes

Edad de ensayo	Tolerancia admisible
24 horas	± 0,5 h o 2,1%
3 días	2 horas o 2,8%
7 días	6 horas o 3,6%
28 días	20 horas o 3,0%
90 días	2 días o 2,2%

4.4.4 *Colocación del espécimen*. Colocar el bloque de carga plano (inferior), con su cara endurecida hacia arriba, sobre la mesa o platina de la máquina de ensayo directamente bajo del bloque de carga esférico (superior). Limpiar las caras de contacto de los bloques superior e inferior y del espécimen de ensayo y colocar el espécimen de ensayo sobre el bloque de carga inferior. Cuidadosamente alinear el eje del espécimen con el centro de carga del bloque de carga esférico.

4.4.4.1 *Verificación del ajuste a cero y asentamiento del bloque.* Previo al ensayo del espécimen, verificar que el indicador de carga esté ajustado a cero. En los casos en los que el indicador no está adecuadamente colocado en cero, ajustar el indicador (ver nota 9). Puesto que se lleva el bloque de carga esférico hasta apoyar sobre el espécimen, girar con la mano y suavemente su parte móvil de tal modo de obtener un asentamiento uniforme.

4.4.5 *Velocidad de carga.* Aplicar la carga continuamente y sin impacto.

4.4.5.1 La carga debe ser aplicada a una velocidad de movimiento (medida desde la platina a la cruceta) correspondiente a una velocidad de esfuerzo sobre el espécimen de 0,25 ± 0,05 MPa/s (ver nota 10). Se debe mantener la velocidad de movimiento señalada al menos durante la última mitad de la fase de la carga esperada.

NOTA 9. La técnica utilizada para verificar y ajustar el indicador de carga a cero puede variar dependiendo del fabricante de la máquina. Consultar el manual del propietario o al calibrador de la máquina de compresión para una técnica adecuada.

NOTA 10. Para una máquina de ensayo milimétrica o de desplazamiento controlado, será necesario un ensayo preliminar para establecer la velocidad de movimiento requerida para lograr la velocidad de esfuerzo especificada. La velocidad de movimiento requerida dependerá del tamaño del espécimen de ensayo, del módulo elástico del hormigón y de la rigidez de la máquina de ensayo.

(Continúa)

4.4.5.2 Se permite una velocidad de carga mayor durante la aplicación de la primera mitad de la fase de carga esperada. La velocidad de carga mayor debe ser aplicada de manera controlada de modo tal que el espécimen no esté sometido a una carga de impacto.

4.4.5.3 No se debe hacer ajustes en la velocidad de movimiento (desde la platina a la cruceta) cuando la carga última está siendo alcanzada y la velocidad de esfuerzo decrece debido a la fisuración en el espécimen.

4.4.6 Aplicar la carga de compresión hasta que el indicador de carga muestre que está decreciendo constantemente y el espécimen muestre un patrón de fractura bien definido (Tipos 1 a 4 en la figura 2 del Anexo A). Para una máquina de ensayo equipada con un detector de rotura de espécimen, no se permite el apagado automático de la máquina de ensayo hasta que la carga haya decrecido hasta un valor menor al 95% de la carga máxima. Cuando se ensaya con cabezales con almohadillas no adherentes (neoprenos), puede ocurrir una fractura en la esquina, similar a los modelos tipo 5 o 6 mostrados en la figura 2 del Anexo A, antes que se haya alcanzado la capacidad última del espécimen, en estos casos se debe continuar comprimiendo el espécimen hasta que el laboratorista esté seguro de que se ha alcanzado la capacidad última. Registrar la carga máxima soportada por el espécimen durante el ensayo y anotar el tipo de modelo de fractura de acuerdo a la figura 2 del Anexo A. Si el modelo de fractura no es uno de los modelos típicos mostrados en la figura 2 del Anexo A, dibujar y describir brevemente el modelo de fractura. Si la resistencia obtenida es menor de lo esperado, examinar el hormigón fracturado y anotar la presencia de grandes cavidades de aire, evidencia de segregación, comprobar si las fracturas pasan predominantemente alrededor o a través de las partículas de árido grueso y verificar si la preparación de los extremos del cilindro fue realizada de acuerdo con las normas ASTM C 617 o ASTM C 1 231.

4.5 Cálculos

4.5.1 Calcular la resistencia a la compresión del espécimen dividiendo la carga máxima soportada por el espécimen durante el ensayo, para el promedio del área de la sección transversal, determinada como se describe en el numeral 4.3 y expresar el resultado con una aproximación a 0,1 MPa.

4.5.2 Si la relación de la longitud al diámetro del espécimen es de 1,75 o menos, corregir el resultado obtenido en el numeral 4.5.1 multiplicando por el factor de corrección apropiado mostrado en la tabla 3 (ver nota 11).

TABLA 3. Factor de corrección según la relación de longitud al diámetro del espécimen

L/D	1,75	1,50	1,25	1,00
Factor:	0,98	0,96	0,93	0,87

4.5.2.1 Para determinar los factores de corrección para los valores L/D intermedios entre los valores dados en la tabla 3, se debe interpolar.

4.5.3 Cuando se ha solicitado, calcular la densidad del espécimen con una aproximación de 10 kg/m³, utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Densidad} = \frac{W}{V} \qquad (2)$$

Donde:

W = Masa del espécimen en kg, y
V = Volumen del espécimen, calculado a partir del diámetro promedio y la longitud promedio, o determinado mediante la obtención de su masa al aire y sumergido, en m³.

NOTA 11. Los factores de corrección dependen de varias condiciones tales como condiciones de humedad, resistencia y módulo de elasticidad. En la tabla se dan los valores promedio. Estos factores de corrección se aplican al hormigón de baja densidad entre 1 600 kg/m³ y 1 920 kg/m³ y al hormigón de densidad normal. Estos son aplicables al hormigón seco o húmedo al momento de la carga y para resistencias nominales del hormigón en un rango de 14 MPa a 42 MPa. Para resistencias mayores a 42 MPa los factores de corrección pueden ser mayores que los valores mostrados en la tabla. Revisar Bartlett, F.M. y MacGregor, J.G., “Effect of Core Length-to-Diameter Ratio on Concrete Core Strength,” ACI Materials Journal, Vol 91, Nº 4, Julio-Agosto, 1994, páginas: 339-348.

4.5.3.1 Cuando el volumen sea determinado mediante la obtención de su masa sumergida, calcular el volumen de la siguiente manera:

$$V = \frac{W - W_s}{\gamma_w} \qquad (3)$$

Donde:

W_s = Masa aparente del espécimen sumergido, en kg, y
γ_w = Densidad del agua a 23 °C = 997,5 kg/m³.

4.6 Informe de resultados. Se debe elaborar un informe de resultados que contenga al menos lo siguiente:

a) Laboratorio y fecha de ensayo,
b) Número de identificación,
c) Diámetro (y longitud, si se encuentra fuera del rango de 1,8 *D* a 2,2 *D*), en milímetros,
d) Área de la sección transversal, en milímetros cuadrados,
e) Carga máxima, en kilonewtons,
f) Resistencia a la compresión calculada con una aproximación de 0,1 MPa,
g) Tipo de fractura, si es diferente que el cono habitual (ver figura 2 del Anexo A),
h) Defectos en cada espécimen o refrentado,
i) Edad del espécimen, y,
j) Densidad, cuando se lo determine, con una aproximación de 10 kg/m³.
k) Observaciones: señalar responsabilidades sobre los procedimientos de muestreo, transporte y curado de especímenes, además de cualquier variación a los procedimientos señalados en esta norma.

4.7 Precisión y desviación

4.7.1 *Precisión*.

4.7.1.1 *Precisión dentro del ensayo.* La tabla 4 proporciona la precisión dentro del ensayo en ensayos de cilindros de 150 mm por 300 mm y de 100 mm por 200 mm moldeados de una muestra de hormigón correctamente mezclada en condiciones de laboratorio y en condiciones de campo (ver el numeral 4.7.1.2).

TABLA 4. Precisión dentro del ensayo

	Coeficiente de variación (ver nota 12)	**Rango aceptable de variación de resistencia de cilindros individuales (ver nota 12)**	
		2 cilindros	**3 cilindros**
Cilindros de 150 por 300 mm Condiciones de laboratorio Condiciones de campo	 2,4% 2,9%	 6,6% 8,0%	 7,8% 9,5%
Cilindros de 100 por 200 mm Condiciones de laboratorio	 3,2%	 9,0%	 10,6%

NOTA 12. Estos números representan respectivamente los límites (1s%) y (d2s%), como se describen en la norma ASTM C 670.

(Continúa)

4.7.1.2 El coeficiente de variación dentro del ensayo representa la variación esperada de la resistencia medida de los cilindros compañeros preparados con la misma muestra de hormigón y ensayados por un laboratorio a la misma edad. Los valores dados para el coeficiente de variación dentro del ensayo de cilindros de 150 mm por 300 mm son aplicables para resistencias a compresión en un rango de 15 MPa a 55 MPa y para los cilindros de 100 mm por 200 mm son aplicables para resistencias a compresión en un rango de 17 MPa a 32 MPa. Los coeficientes de variación dentro del ensayo para cilindros de 150 mm por 300 mm se obtienen de los datos del CCRL (Concrete Proficiency Sample Data), para condiciones de laboratorio y una compilación de 1 265 informes de ensayos de 225 laboratorios de ensayos comerciales en 1978 (ver nota 13). El coeficiente de variación dentro del ensayo para cilindros de 100 mm por 200 mm se obtienen de los datos del CCRL (Concrete Proficiency Sample Data), para condiciones de laboratorio (ver nota14).

4.7.1.3 *Precisión multilaboratorio*. Se ha encontrado que el coeficiente de variación multilaboratorio para los resultados de ensayo de resistencia a la compresión en cilindros de 150 mm por 300 mm es de 5,0% (ver nota 12); por lo tanto, los resultados de los ensayos apropiadamente realizados por dos laboratorios en especímenes preparados de la misma muestra de hormigón, no deben diferir en más del 14% (ver nota 12) del promedio, (ver nota 15). El resultado de un ensayo de resistencia es el promedio de dos cilindros ensayados a la misma edad.

4.7.1.4 Los datos multilaboratorio fueron obtenidos de seis ensayos de resistencia separados, organizados a través de programas de todos contra todos (ver nota 14) donde los especímenes cilíndricos de 150 mm por 300 mm fueron preparados en una sola ubicación y ensayados por diferentes laboratorios. El rango de resistencia promedio de estos programas fue de 17,0 MPa a 90 MPa.

4.7.2 *Desviación*. Dado que no hay un material de referencia aceptado, no se hace ninguna declaración de desviación.

NOTA 13. Los datos de apoyo han sido archivados en las oficinas de ASTM Internacional y pueden obtenerse solicitando el Informe de Investigación RR: C09-1006.

NOTA 14. Los datos de apoyo han sido archivados en las oficinas de ASTM Internacional y pueden obtenerse solicitando el Informe de Investigación RR: C09-1027.

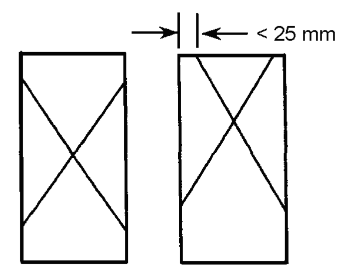
NOTA 15. La precisión multilaboratorio no incluye variaciones asociadas con diferentes laboratoristas que preparan especímenes de ensayos de muestras de hormigón divididas o independientes. Es posible que estas variaciones incrementen el coeficiente de variación multilaboratorio.

(Continúa)

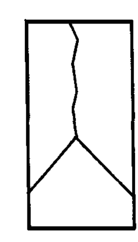
ANEXO A

(Información obligatoria)

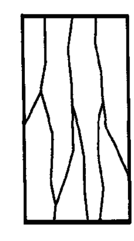
FIGURA 2. Esquema de los modelos típicos de fractura



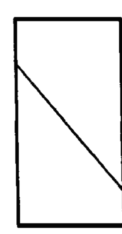
Tipo 1
Conos en ambos extremos razonablemente bien formados, fisuras a través de la cabecera menor a 25 mm



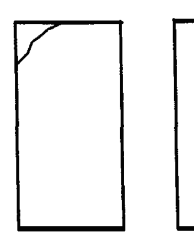
Tipo 2
Cono bien formado en uno de los extremos, fisuras verticales que recorren a través de la cabecera, cono no muy definido en el otro extremo.



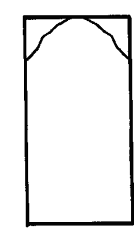
Tipo 3
Fisura vertical columnar a través de ambos extremos, conos no muy definidos.



Tipo 4
Fractura diagonal sin fisuras a través de los bordes; golpear con un martillo para distinguir del Tipo 1



Tipo 5
Fracturas a los lados, en el extremo superior o en el fondo (ocurren comunmente cuando se ensaya con neoprenos)



Tipo 6
Similar al Tipo 5, pero el extremo del cilindro está en punta

(Continúa)

APÉNDICE Z

Z.1 DOCUMENTOS NORMATIVOS A CONSULTAR

Norma ASTM C 31 *Práctica para hacer y curar especímenes de ensayo de hormigón en el campo*.
Norma ASTM C 42 *Método de ensayo para obtener y ensayar núcleos calados y vigas aserradas de hormigón.*
Norma ASTM C 192 *Práctica para hacer y curar especímenes de ensayo de hormigón en el laboratorio*.
Norma ASTM C 617 *Práctica para refrentar especímenes cilíndricos de hormigón*.
Norma ASTM C 670 *Práctica para la preparación de informes de precisión y desviación para métodos de ensayo para materiales de construcción*
Norma ASTM C 873 *Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de cilindros de hormigón tomados en la obra en moldes cilíndricos.*
Norma ASTM C 1077 *Práctica para laboratorios de ensayo de hormigón y áridos para hormigón para uso en la construcción y criterios para la evaluación de laboratorios*.
Norma ASTM C 1231 *Práctica para uso de cabezales no adherentes en la determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de hormigón endurecido*.
Norma ASTM E 4 *Prácticas para la verificación de la presión en máquinas de ensayo*.
Norma ASTM E 74 *Práctica para la calibración de los instrumentos que miden la presión para verificar el indicador de presión en las máquinas de ensayo*.

Z.2 BASE DE ESTUDIO

ASTM C 39 – 05. *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.* American Society for Testing and Materials. Philadelphia, 2005.

INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA

Documento: NTE INEN 1 573 Primera Revisión	TÍTULO: HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO	Código: CO 02.10-301

ORIGINAL:	REVISIÓN:
Fecha de iniciación del estudio:	Fecha de aprobación anterior del Consejo Directivo 1990-06-26 Oficialización con el Carácter de **Obligatoria - Emergente** por Acuerdo Ministerial No. 414 de 1990-08-20 publicado en el Registro Oficial No. 524 de 1990-09-18 Fecha de iniciación del estudio: 2009-09-17

Fechas de consulta pública: de a

Subcomité Técnico: HORMIGÓN, ÁRIDOS Y MORTEROS
Fecha de iniciación: 2009-09-24 Fecha de aprobación: 2009-10-01
Integrantes del Subcomité Técnico:

NOMBRES:	**INSTITUCIÓN REPRESENTADA:**
Ing. Guillermo Realpe (Presidente)	FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
Ing. José Arce (Vicepresidente)	HORMIGONES HÉRCULES S. A.
Ing. Jaime Salvador	INSTITUTO ECUATORIANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO. INECYC.
Ing. Raúl Ávila	ASOCIACIÓN DE PRODUCTORES DE HORMIGÓN PREMEZCLADO DEL ECUADOR. APRHOPEC.
Ing. Hugo Egüez	HOLCIM ECUADOR S. A. AGREGADOS
Ing. Raúl Cabrera	HOLCIM ECUADOR S. A. HORMIGONES
Sr. Carlos Aulestia	LAFARGE CEMENTOS S. A.
Ing. Xavier Arce	CÁMARA CONSTRUCCIÓN GUAYAQUIL.
Ing. Marlon Valarezo	UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
Arq. Soledad Moreno .	INTACO ECUADOR S. A.
Ing. Carlos González	INTACO ECUADOR S. A.
Ing. Víctor Buri	HORMIGONES HÉRCULES S. A.
Ing. Douglas Alejandro	MUNICIPIO DE GUAYAQUIL.
Ing. Verónica Miranda	COLEGIO INGENIEROS CIVILES PICHINCHA / HORMIGONES EQUINOCCIAL
Ing. Diana Sánchez	FACULTAD DE INGENIERÍA. PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR.
Ing. Stalin Serrano	HORMIGONES EQUINOCCIAL.
Ing. Xavier Herrera	HORMIGONERA QUITO
Ing. Mireya Martínez	CAMINOSCA CIA. LTDA.
Ing. Rubén Vásquez	CEMENTO CHIMBORAZO C. A.
Ing. Víctor Luzuriaga	INDUSTRIAS GUAPÁN S. A.
Ing. Patricio Torres	DICOPLAN CIA. LTDA.
Ing. Luis Balarezo	CUERPO DE INGENIEROS DEL EJÉRCITO
Ing. Carlos Castillo (Prosecretario Técnico)	INECYC.

Otros trámites: ♦[5] La NTE INEN 1 573:1990 sin ningún cambio en su contenido fue **DESREGULARIZADA,** pasando de **OBLIGATORIA-EMERGENTE a VOLUNTARIA,** según Acuerdo Ministerial No. 236 de 1998-01-08 publicado en el Registro Oficial No. 321 de 1998-05-20.
Esta NTE INEN 1 573:2010 (Primera Revisión), reemplaza a la NTE INEN 1573:1990

El Directorio del INEN aprobó este proyecto de norma en sesión de 2010-03-26

Oficializada como: **Voluntaria** Por Resolución No. 035-2010 de 2010-04-02
Registro Oficial No. 213 de 2010-06-14

Instituto Ecuatoriano de Normalización, INEN - Baquerizo Moreno E8-29 y Av. 6 de Diciembre
Casilla 17-01-3999 - Telfs: (593 2)2 501885 al 2 501891 - Fax: (593 2) 2 567815
Dirección General: E-Mail:direccion@inen.gov.ec
Área Técnica de Normalización: E-Mail:normalizacion@inen.gov.ec
Área Técnica de Certificación: E-Mail:certificacion@inen.gov.ec
Área Técnica de Verificación: E-Mail:verificacion@inen.gov.ec
Área Técnica de Servicios Tecnológicos: E-Mail:inencati@inen.gov.ec
Regional Guayas: E-Mail:inenguayas@inen.gov.ec
Regional Azuay: E-Mail:inencuenca@inen.gov.ec
Regional Chimborazo: E-Mail:inenriobamba@inen.gov.ec
URL:www.inen.gov.ec

ACI 544.1R-96
(Reapproved 2002)

State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete

Reported by ACI Committee 544

James I. Daniel* Chairman	Vellore S. Gopalaratnam Secretary	Melvyn A. Galinat Membership Secretary
Shuaib H. Ahmad	George C. Hoff	Morris Schupack
M. Arockiasamy	Roop L. Jindal	Surendra P. Shah‡‡
P. N. Balaguru**	Colin D. Johnston	George D. Smith
Hiram P. Ball, Jr.	Mark A. Leppert	Philip A. Smith
Nemkumar Banthia	Clifford N. MacDonald	Parvis Soroushian
Gordon B. Batson	Pritpal S. Mangat	James D. Speakman
M. Ziad Bayasi	Henry N. Marsh, Jr.††	David J. Stevens
Marvin E. Criswell	Nicholas C. Mitchell	R. N. Swamy
Daniel P. Dorfmueller	Henry J. Molloy‡	Peter C. Tatnall†
Marsha Feldstein	D. R. Morgan	Ben L. Tilsen
Antonio V. Fernandez	A. E. Naaman	George J. Venta§§
Sidney Freedman	Antonio Nanni	Gary L. Vondran
David M. Gale	Seth L. Pearlman*	Methi Wecharatana
Antonio J. Guerra**	Max L. Porter	Spencer T. Wu
Lloyd E. Hackman	V. Ramakrishnan	Robert C. Zellers
C. Geoffrey Hampson	Ken Rear	Ronald F. Zollo§
M. Nadim Hassoun	D. V. Reddy	
Carol D. Hays	Ernest K. Schrader	

* Cochairmen, State-of-the-Art Subcommittee; responsible for preparing Chapter 1 and coordinating the entire report.
† Chairman, Steel Fiber Reinforced Concrete Subcommittee; responsible for preparing Chapter 2.
‡ Chairman, Glass Fiber Reinforced Concrete Subcommittee; responsible for perparing Chapter 3.
§ Chairman, Synthetic Fiber Reinforced Concrete Subcommittee; responsible for preparing Chapter 4.
** Cochairmen, Natural Fiber Reinforced Concrete Subcommittee; responsible for preparing Chapter 5.
†† Chairman, Editorial Subcommittee; responsible for reviewing and final editing the entire report.
‡‡ Previous Chairman of Committee 544; responsible for overseeing the development of the majority of this State-of-the-Art Report.
§§ Previous Chairman of Glass Fiber Reinforced Concrete Subcommittee; responsible for overseeing the development of much of Chapter 3.

The report prepared by ACI Committee 544 on Fiber Reinforced Concrete (FRC) is a comprehensive review of all types of FRC. It includes fundamental principles of FRC, a glossary of terms, a description of fiber types, manufacturing methods, mix proportioning and mixing methods, installation practices, physical properties, durability, design considerations, applications, and research needs. The report is broken into five chapters: Introduction, Steel FRC, Glass FRC, Synthetic FRC, and Natural FRC.

Fiber reinforced concrete (FRC) is concrete made primarily of hydraulic cements, aggregates, and discrete reinforcing fibers. Fibers suitable for reinforcing concrete have been produced from steel, glass, and organic polymers (synthetic fibers). Naturally occurring asbestos fibers and vegetable fibers, such as sisal and jute, are also used for reinforcement. The concrete matrices may be mortars, normally proportioned mixes, or mixes specifically formulated for a particular application. Generally, the length and diameter of the fibers used for FRC do not exceed 3 in. (76 mm) and 0.04 in. (1 mm), respectively. The report is written so that the reader may gain an overview of the property enhancements of FRC and the applications for each general category of fiber type (steel, glass, synthetic, and natural fibers).

Brittle materials are considered to have no significant post-cracking ductility. Fibrous composites have been and are being developed to provide improved mechanical properties to otherwise brittle materials. When subjected to ten-

ACI 544.1-96 became effective November 18, 1996. This report supercedes ACI 544.1R-82(86).

sion, these unreinforced brittle matrices initially deform elastically. The elastic response is followed by microcracking, localized macrocracking, and finally fracture. Introduction of fibers into the concrete results in post-elastic property changes that range from subtle to substantial, depending upon a number of factors, including matrix strength, fiber type, fiber modulus, fiber aspect ratio, fiber strength, fiber surface bonding characteristics, fiber content, fiber orientation, and aggregate size effects. For many practical applications, the matrix first-crack strength is not increased. In these cases, the most significant enhancement from the fibers is the post-cracking composite response. This is most commonly evaluated and controlled through toughness testing (such as measurement of the area under the load-deformation curve).

If properly engineered, one of the greatest benefits to be gained by using fiber reinforcement is improved long-term serviceability of the structure or product. Serviceability is the ability of the specific structure or part to maintain its strength and integrity and to provide its designed function over its intended service life.

One aspect of serviceability that can be enhanced by the use of fibers is control of cracking. Fibers can prevent the occurrence of large crack widths that are either unsightly or permit water and contaminants to enter, causing corrosion of reinforcing steel or potential deterioration of concrete [1.1]. In addition to crack control and serviceability benefits, use of fibers at high volume percentages (5 to 10 percent or higher with special production techniques) can substantially increase the matrix tensile strength [1.1].

CONTENTS

CHAPTER 1—INTRODUCTION

1.1—Historical aspects

Since ancient times, fibers have been used to reinforce brittle materials. Straw was used to reinforce sun-baked bricks, and horsehair was used to reinforce masonry mortar and plaster. A pueblo house built around 1540, believed to be the oldest house in the U.S., is constructed of sun-baked adobe reinforced with straw. In more recent times, large scale commercial use of asbestos fibers in a cement paste matrix began with the invention of the Hatschek process in 1898. Asbestos cement construction products are widely used throughout the world today. However, primarily due to health hazards associated with asbestos fibers, alternate fiber types were introduced throughout the 1960s and 1970s.

In modern times, a wide range of engineering materials (including ceramics, plastics, cement, and gypsum products) incorporate fibers to enhance composite properties. The enhanced properties include tensile strength, compressive strength, elastic modulus, crack resistance, crack control, durability, fatigue life, resistance to impact and abrasion, shrinkage, expansion, thermal characteristics, and fire resistance.

Experimental trials and patents involving the use of discontinuous steel reinforcing elements—such as nails, wire segments, and metal chips—to improve the properties of concrete date from 1910 [1.2]. During the early 1960s in the United States, the first major investigation was made to evaluate the potential of steel fibers as a reinforcement for concrete [1.3]. Since then, a substantial amount of research, development, experimentation, and industrial application of steel fiber reinforced concrete has occurred.

Use of glass fibers in concrete was first attempted in the USSR in the late 1950s [1.4]. It was quickly established that

ordinary glass fibers, such as borosilicate E-glass fibers, are attacked and eventually destroyed by the alkali in the cement paste. Considerable development work was directed towards producing a form of alkali-resistant glass fibers containing zirconia [1.5]. This led to a considerable number of commercialized products. The largest use of glass fiber reinforced concrete in the U.S. is currently for the production of exterior architectural cladding panels.

Initial attempts at using synthetic fibers (nylon, polypropylene) were not as successful as those using glass or steel fibers [1.6, 1.7]. However, better understanding of the concepts behind fiber reinforcement, new methods of fabrication, and new types of organic fibers have led researchers to conclude that both synthetic and natural fibers can successfully reinforce concrete [1.8, 1.9].

Considerable research, development, and applications of FRC are taking place throughout the world. Industry interest and potential business opportunities are evidenced by continued new developments in fiber reinforced construction materials. These new developments are reported in numerous research papers, international symposia, and state-of-the-art reports issued by professional societies. The ACI Committee 544 published a state-of-the-art report in 1973 [1.10]. RILEM's committee on fiber reinforced cement composites has also published a report [1.11]. A Recommended Practice and a Quality Control Manual for manufacture of glass fiber reinforced concrete panels and products have been published by the Precast/Prestressed Concrete Institute [1.12, 1.13]. Three recent symposium proceedings provide a good summary of the recent developments of FRC [1.14, 1.15, 1.16].

Specific discussions of the historical developments of FRC with various fiber types are included in Chapters 2 through 5.

1.2—Fiber-reinforced versus conventionally-reinforced concrete

Unreinforced concrete has a low tensile strength and a low strain capacity at fracture. These shortcomings are traditionally overcome by adding reinforcing bars or prestressing steel. Reinforcing steel is continuous and is specifically located in the structure to optimize performance. Fibers are discontinuous and are generally distributed randomly throughout the concrete matrix. Although not currently addressed by ACI Committee 318, fibers are being used in structural applications with conventional reinforcement.

Because of the flexibility in methods of fabrication, fiber reinforced concrete can be an economic and useful construction material. For example, thin ($^1/_2$ to $^3/_4$ in. [13 to 20 mm] thick), precast glass fiber reinforced concrete architectural cladding panels are economically viable in the U.S. and Europe. In slabs on grade, mining, tunneling, and excavation support applications, steel and synthetic fiber reinforced concrete and shotcrete have been used in lieu of welded wire fabric reinforcement.

1.3—Discussion of fiber types

There are numerous fiber types available for commercial and experimental use. The basic fiber categories are steel, glass, synthetic, and natural fiber materials. Specific descriptions of these fiber types are included in Chapters 2 through 5.

1.4—Production aspects

For identical concrete mixtures, addition of fibers will result in a loss of slump as measured by ASTM C 143. This loss is magnified as the aspect ratio of the fiber or the quantity of fibers added increases. However, this slump loss does not necessarily mean that there is a corresponding loss of workability, especially when vibration is used during placement. Since slump is not an appropriate measure of workability, it is recommended that the inverted slump cone test (ASTM C 995) or the Vebe Test (BS 1881) be used to evaluate the workability of fresh FRC mixtures.

For conventionally mixed steel fiber reinforced concrete (SFRC), high aspect ratio fibers are more effective in improving the post-peak performance because of their high resistance to pullout from the matrix. A detrimental effect of using high aspect ratio fibers is the potential for balling of the fibers during mixing. Techniques for retaining high pullout resistance while reducing fiber aspect ratio include enlarging or hooking the ends of the fibers, roughening their surface texture, or crimping to produce a wavy rather than straight fiber profile. Detailed descriptions of production methods for SFRC are found in Chapter 2.

Glass fiber reinforced concretes (GFRC) are produced by either the spray-up process or the premix process. In the spray-up process, glass fibers are chopped and simultaneously deposited with a sprayed cement/sand slurry onto forms producing relatively thin panels ranging from $^1/_2$ to $^3/_4$ in. (13 to 20 mm) thick. In the premix process, a wet-mix cement-aggregate-glass fiber mortar or concrete is cast, press molded, extruded, vibrated, or slip formed. Glass fiber mortar mixes are also produced for surface bonding, spraying, or shotcreting. Specific GFRC production technologies are described in Chapter 3.

Synthetic fiber reinforced concretes (SNFRC) are generally mixed in batch processes. However, some pre-packaged

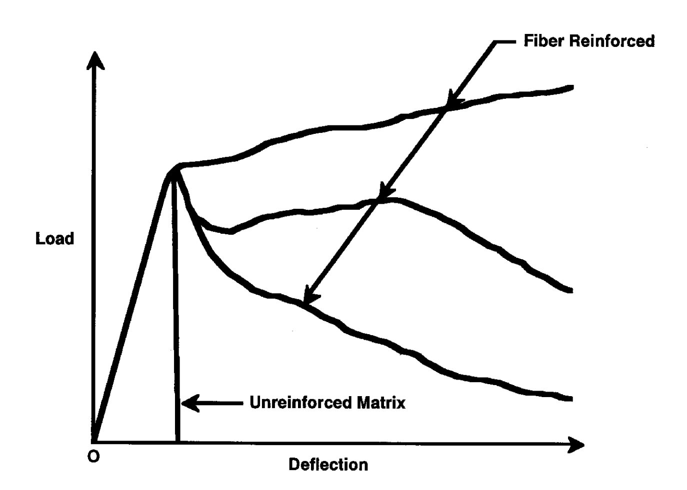


Fig. 1.1—Range of load versus deflection curves for unreinforced matrix and fiber reinforced concrete

dry mixtures have been used. Flat sheet products that are pressed, extruded, or vacuum dewatered have also been produced. Long fibers are more effective in improving post-peak performance, but balling may become a problem as fiber length is increased. Techniques for enhancing pullout resistance while keeping fibers short enough to avoid balling include surface texturing and splitting to produce branching and mechanical anchorage (fibrillation). Chapter 4 offers a full description of production technologies for SNFRC.

Natural fiber reinforced concretes (NFRC) require special mix proportioning considerations to counteract the retardation effects of the glucose in the fibers. Wet-mix batch processes and wet-compacted mix procedures are used in plant production environments. Details for production methods of NFRC are presented in Chapter 5.

1.5—Developing technologies

SFRC technology has grown over the last three decades into a mature industry. However, improvements are continually being made by industry to optimize fibers to suit applications. A current need is to consolidate the available knowledge for SFRC and to incorporate it into applicable design codes.

A developing technology in SFRC is a material called SIFCON (Slurry Infiltrated Fiber Concrete). It is produced by filling an empty mold with loose steel fibers (about 10 percent by volume) and filling the voids with a high strength cement-based slurry. The resulting composite exhibits high strength and ductility, with the versatility to be shaped by forms or molds [1.17].

GFRC technology is continuing to develop in areas of matrix improvements, glass composition technology, and in manufacturing techniques. New cements and additives have improved composite durability, and new equipment and application techniques have increased the material’s versatility.

SNFRC is a rapidly growing FRC technology area due to the availability of a wide spectrum of fiber types and a wide range of obtainable composite enhancements. To date, the largest use of synthetic fibers is in ready-mix applications for flat slab work to control bleeding and plastic shrinkage cracking. This application generally uses 0.1 percent by volume of relatively low modulus synthetic fibers.

Higher volume percentages (0.4 to 0.7 percent) of fibers have been found to offer significant property enhancements to the SNFRC, mainly increased toughness after cracking and better crack distribution with reductions in crack width. Chapter 4 details the current technological advancements in SNFRC in separate sections that discuss each specific fiber material.

As described in Chapter 5, natural fiber reinforced concretes vary enormously in the sophistication by which they are manufactured. Treatment of the fibers also varies considerably. In less developed countries, fibers are used in a minimally treated state. In more advanced countries, wood pulp fibers are used. These fibers have been extracted by an advanced industrial process which significantly alters the character of the fibers and makes them suitable for their end uses.

1.6—Applications

As more experience is gained with SFRC, more applications are accepted by the engineering community. ACI Committee 318 “Building Code Requirements for Reinforced Concrete” does not yet recognize the enhancements that SFRC makes available to structural elements. As more experience is gained and reported, more data will be available to contribute to the recognition of enhanced SFRC properties in this and other codes. The most significant properties of SFRC are the improved flexural toughness (such as the ability to absorb energy after cracking), impact resistance, and flexural fatigue endurance. For this reason, SFRC has found many applications in flat slabs on grade where it is subject to high loads and impact. SFRC has also been used for numerous shotcrete applications for ground support, rock slope stabilization, tunneling, and repairs. It has also found applications in plant-produced products including concrete masonry crib elements for roof support in mines (to replace wood cribbing). SIFCON is being developed for military applications such as hardened missile silos, and may be promising in many public sector applications such as energy absorbing tanker docks. SFRC applications are further summarized in Chapter 2.

GFRC has been used extensively for architectural cladding panels due to its light weight, economy, and ability to be formed against vertical returns on mold surfaces without back forms. It has also been used for many plant manufactured products. Pre-packaged surface bonding products are used for dry stacked concrete masonry walls in housing applications and for air-stoppage walls in mines. Chapter 3 discusses the full range of GFRC applications.

SNFRC has found its largest commercial uses to date in slabs on grade, floor slabs, and stay-in-place forms in multi-story buildings. Recent research in fibers and composites has opened up new possibilities for the use of synthetic fibers in construction elements. Thin products produced with synthetic fibers can demonstrate high ductility while retaining integrity. Chapter 4 discusses applications of SNFRC for various fiber types.

Applications for NFRC range from the use of relatively low volume amounts of natural fibers in conventionally cast concrete to the complex machine manufacture of high fiber content reinforced cement sheet products, such as roof shingles, siding, planks, utility boards, and pipes. Chapter 5 discusses NFRC in more detail.

1.7—Glossary

The following FRC terms are not already defined in ACI 116R “Definitions of Terms for Concrete.”

1.7.1—*General terms*

Aspect ratio—The ratio of length to diameter of the fiber. Diameter may be equivalent diameter.

Balling—When fibers entangle into large clumps or balls in a mixture.

Bend-over-point (BOP)—The greatest stress that a material is capable of developing without any deviation from proportionality of stress to strain. This term is generally (but not always) used in the context of glass fiber reinforced concrete (GFRC) tensile testing. See “PEL” for flexural testing. The

term "First Crack Strength" is the same property but often used for fiber concretes other than GFRC.

Collated—Fibers bundled together either by cross-linking or by chemical or mechanical means.

Equivalent diameter—Diameter of a circle with an area equal to the cross-sectional area of the fiber. See "SNFRC Terms" for the determination of equivalent diameter.

Fiber count—The number of fibers in a unit volume of concrete matrix.

First crack—The point on the flexural load-deflection or tensile load-extension curve at which the form of the curve first becomes nonlinear.

First crack strength—The stress corresponding to the load at "First Crack" (see above) for a fiber reinforced concrete composite in bending or tension.

Flexural toughness—The area under the flexural load-deflection curve obtained from a static test of a specimen up to a specified deflection. It is an indication of the energy absorption capability of a material.

Impact strength—The total energy required to break a standard test specimen of a specified size under specified impact conditions.

Modulus of rupture (MOR)—The greatest bending stress attained in a flexural strength test of a fiber reinforced concrete specimen. Although modulus of rupture is synonymous with matrix cracking for plain concrete specimens, this is not the case for fiber reinforced concrete specimens. See proportional elastic limit (PEL) for definition of cracking in fiber reinforced concrete.

Monofilament—Single filament fiber typically cylindrical in cross-section.

Process fibers—Fibers added to the concrete matrix as fillers or to facilitate a production process.

Proportional elastic limit (PEL)—The greatest bending stress that a material is capable of developing without significant deviation from proportionality of stress to strain. This term is generally (but not always) used in the context of glass fiber reinforced concrete (GFRC) flexural testing. "Bend Over Point (BOP)" is the term given to the same property measured in a tensile test. The term "First Crack Strength" is the same property, but often used for fiber concretes other than GFRC.

Specific surface—The total surface area of fibers in a unit volume of concrete matrix.

Toughness indices—The numbers obtained by dividing the area under the load-deflection curve up to a specified deflection by the area under the load-deflection curve up to "First Crack."

Ultimate tensile strength (UTS)—The greatest tensile stress attained in a tensile strength test of a fiber reinforced concrete specimen.

1.7.2—*SFRC terms*

SFRC—Steel fiber reinforced concrete.

1.7.3—*GFRC terms*

Embrittlement—Loss of composite ductility after aging caused by the filling of the interstitial spaces surrounding individual glass fibers in a fiber bundle or strand with hydration products, thereby increasing fiber-to-matrix bond and disallowing fiber slip.

AR-GFRC—Alkali resistant-glass fiber reinforced concrete.

GFRC—Glass fiber reinforced concrete. Typically, GFRC is AR-GFRC.

P-GFRC—Polymer modified-glass fiber reinforced concrete.

Polymer addition—Less than 10 percent polymer solids by volume of total mix.

Polymer modified—Greater than or equal to 10 percent polymer solids by volume of total mix.

1.7.4—*SNFRC terms*

Denier—Weight in grams of 9000 meters of a single fiber.

Equivalent diameter—Diameter of a circle with an area equal to the cross-sectional area of the fiber. For SNFRC, equivalent fiber diameter, d, is calculated by:

$$d = f\left[\frac{D}{SG}\right]^{1/2}$$

Where:

f = 0.0120 for d in mm
f = 0.0005 for d in inches
D = fiber denier
SG = fiber specific gravity

Fibrillated—A slit film fiber where sections of the fiber peel away, forming branching fibrils.

Fibrillated networks—Continuous networks of fiber, in which the individual fibers have branching fibrils.

Monofilament—Any single filament of a manufactured fiber, usually of a denier higher than 14. Instead of a group of filaments being extruded through a spinneret to form a yarn, monofilaments generally are spun individually.

Multifilament—A yarn consisting of many continuous filaments or strands, as opposed to monofilament, which is one strand. Most textile filament yarns are multifilament.

Post-mix denier—The average denier of fiber as dispersed throughout the concrete mixture (opened fibrils).

Pre-mix denier—The average denier of fiber as added to the concrete mixture (unopened fibrils).

Staple—Cut lengths from filaments. Manufactured staple fibers are cut to a definite length. The term staple (fiber) is used in the textile industry to distinguish natural or cut length manufactured fibers from filament.

SNFRC—Synthetic fiber reinforced concrete.

Tenacity—Having high tensile strength.

Tow—A twisted multifilament strand suitable for conversion into staple fibers or sliver, or direct spinning into yarn.

1.7.5—*NFRC terms*

NFRC—Natural fiber reinforced concrete.

PNF—Processed natural fibers

PNFRC—Processed natural fiber reinforced concrete

UNF—Unprocessed natural fibers

1.8—Recommended references

General reference books and documents of the various organizations are listed below with their serial designation. These documents may be obtained from the following organizations:

American Concrete Institute
P. O. Box 9094
Farmington Hills, MI 48333-9094, USA

American Society for Testing and Materials
1916 Race Street, Philadelphia, PA 19103, USA

British Standards Institute
2 Park Street, London W1A 2B5, England

Japanese Society of Civil Engineers
Mubanchi, Yotsuya 1 - chome, Shinjuku - ku, Tokyo 160, Japan

RILEM
Pavillon Du Crous, 61 Av. Du President Wilson, 94235 Cachan, France

1.8.1—*ACI committee documents*

116 R Cement and Concrete Terminology
201.2R Guide to Durable Concrete
211.3 Standard Practice for Selecting Proportions for No-Slump Concrete
223 Standard Practice for the Use of Shrinkage-Compensating Concrete
304 R Guide for Measuring, Mixing, Transporting, and Placing Concrete
318 Building Code Requirements for Reinforced Concrete
506.1R State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Shotcrete
506.2R Standard Specification for Materials, Proportioning, and Application of Shotcrete
544.2R Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete
544.3R Guide for Specifying, Proportioning, Mixing, Placing, and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete
544.4R Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete
549R State-of-the-Art Report on Ferrocement

1.8.2 *ACI Special Publications*

SP-155 Testing of Fiber Reinforced Concrete, edited by D. J. Stevens, N. Banthia, V. S. Gopalaratnam, and P. C. Tatnall, (*Proceedings*, March 1995 Symposium, Salt Lake City)
SP-142 Fiber Reinforced Concrete—Developments and Innovations, edited by J. I. Daniel and S. P. Shah, (Proceedings, March 1991 and November 1991 Symposia, Boston and Dallas)
SP-124 Thin-Section Fiber Reinforced Concrete and Ferrocement, edited by J. I. Daniel and S. P. Shah, (*Proceedings*, February 1989 and November 1989 Symposia, Atlanta and San Diego)
SP-105 Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications, edited by S. P. Shah and G. B. Batson, (*Proceedings*, November 1986 and March 1987 Symposia, Baltimore and San Antonio)
SP-81 Fiber Reinforced Concrete (*Proceedings*, September 1982 Symposium, Detroit)
SP-44 Fiber Reinforced Concrete (*Proceedings*, October 1973 Symposium, Ottawa)

1.8.3—*RILEM symposia volumes*

1. *Proceedings* 15, *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*, edited by H. W. Reinhardt and A. E. Naaman, Proceedings of the International Workshop held jointly by RILEM and ACI, Stuttgart University and the University of Michigan, E & FN Spon, ISBN 0 419 39270 4, June 1991, 584 pp.
2. *Proceedings* 17, *Fibre Reinforced Cement and Concrete*, edited by R. N. Swamy, Proceedings of the Fourth RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Cement and Concrete, E & FN Spon, ISBN 0 419 18130 X, 1992, 1376 pp.
3. *Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete,* RILEM Symposium Proceedings, RILEM Committee 49-TFR, 1986, 2 volumes.
4. *Testing and Test Methods of Fibre Cement Composites*, RILEM Symposium Proceedings, Construction Press Ltd., 1978, 545 pp.
5. *Fibre Reinforced Cement and Concrete*, RILEM Symposium Proceedings, Construction Press Ltd., 1975, 650 pp. in 2 volumes.

1.8.4—*Books*

1. Balaguru, P. N., and Shah, S. P., *Fiber-Reinforced Cement Composites*, McGraw-Hill, Inc., 1992.
2. Daniel, J. I.; Roller, J. J;, Litvin, A.; Azizinamini, A.; and Anderson, E. D., “Fiber Reinforced Concrete,” SP 39.01T, Portland Cement Association, Skokie, 1991.
3. Majumdar, A. J., and Laws, V., *Glass Fibre Reinforced Cement*, Building Research Establishment (U.K.), BPS Professional Books Division of Blackwell Scientific Publications Ltd., 1991, 192 pp.
4. Bentur, A., and Mindess, S., *Fibre Reinforced Cementitious Composites*, Elsevier Applied Science, 1990.
5. Swamy, R. N., and Barr, B., *Fibre Reinforced Cement and Concrete: Recent Developments*, Elsevier Applied Science Publishers Ltd., 1989.
6. *Steel Fiber Concrete*, US-Sweden Joint Seminar, Elsevier Applied Science Publishers Ltd., 1986, 520 pp.
7. Hannant, D. J., *Fibre Cements and Fibre Concretes*, John Wiley and Sons, 1978.

1.8.5—*ASTM standards*

A 820 Specification for Steel Fibers for Fiber Reinforced Concrete
C 31 Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field
C 39 Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens
C 78 Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)
C 94 Specification for Ready-Mixed Concrete
C 143 Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete
C 157 Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic Cement Mortar and Concrete
C 172 Procedure for Sampling Freshly Mixed Concrete
C 173 Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Volumetric Method
C 231 Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method
C 360 Test Method for Ball Penetration in Freshly Mixed Hydraulic Cement Concrete
C 469 Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression
C 597 Test Method for Pulse Velocity through Concrete
C 685 Specification for Concrete Made by Volumetric Batching and Continuous Mixing
C 779 Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces
C 827 Test Method for Early Volume Change of Cementitious Mixtures

C 947 Test Method for Flexural Properties of Thin-Section Glass-Fiber Reinforced Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)

C 948 Test Method for Dry and Wet Bulk Density, Water Absorption, and Apparent Porosity of Thin-Section Glass-Fiber Reinforced Concrete

C 995 Test Method for Time of Flow of Fiber Reinforced Concrete Through Inverted Slump Cone

C 1018 Test Method for Flexural Toughness and First Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading)

C 1116 Specification for Fiber Reinforced Concrete and Shotcrete

C 1170 Test Methods for Consistency and Density of Roller-Compacted Concrete Using a Vibrating Table

C1228 Practice for Preparing Coupons for Flexural and Washout Tests on Glass-Fiber Reinforced Concrete

C 1229 Test Method for Determination of Glass-Fiber Content in Glass-Fiber Reinforced Concrete (GFRC)

C 1230 Test Method for Performing Tension Tests on Glass-Fiber Reinforced Concrete (GFRC) Bonding Pads

E 84 Test Method for Surface Burning Characteristics of Building Materials

E 119 Fire Tests of Building Construction and Materials

E 136 Test Method for Behavior of Materials in a Vertical Tube Furnace at 750 C

1.8.6—*British Standards Institute*

BS 476: Part 4 Non-Combustibility Test for Materials

BS 1881: Part 2 Methods of Testing Concrete

1.8.7—*Japanese Society of Civil Engineers*

JSCE Standard III-1 Specification of Steel Fibers for Concrete, Concrete Library No. 50, March, 1983

1.8.8—*Indian standards*

IS 5913: 1970 Acid Resistance Test for Materials

1.9—Cited references

1.1 Shah, S. P., "Do Fibers Increase the Tensile Strength of Cement Based Matrices?," *ACI Materials Journal*, Vol. 88, No. 6, Nov. 1991, pp. 595-602.

1.2 Naaman, A. E., "Fiber Reinforcement for Concrete," *Concrete International: Design and Construction*, Vol. 7, No. 3, Mar. 1985, pp. 21-25.

1.3 Romualdi, J. P., and Batson, G. B., "Mechanics of Crack Arrest in Concrete," *J. Eng. Mech. Div.*, ASCE, Vol. 89, No. EM3, June 1963, pp. 147-168.

1.4 Biryukovich, K. L., and Yu, D. L., "Glass Fiber Reinforced Cement," translated by G. L. Cairns, *CERA Translation*, No. 12, Civil Eng. Res. Assoc., London, 1965, 41 pp.

1.5 Majumdar, A. J., "Properties of Fiber Cement Composites," *Proceedings*, RILEM Symp., London, 1975, Construction Press, Lancaster, 1976, pp. 279-314.

1.6 Monfore, G. E., "A Review of Fiber Reinforced Portland Cement Paste, Mortar, and Concrete," *J. Res. Dev. Labs*, Portl. Cem. Assoc., Vol. 10, No. 3, Sept. 1968, pp. 36-42.

1.7 Goldfein, S., "Plastic Fibrous Reinforcement for Portland Cement," *Technical Report* No. 1757-TR, U.S. Army Research and Development Laboratories, Fort Belvoir, Oct. 1963, pp. 1-16.

1.8 Krenchel, H., and Shah, S., "Applications of Polypropylene Fibers in Scandinavia," *Concrete International*, Mar. 1985.

1.9 Naaman, A.; Shah. S.; and Throne, J., *Some Developments in Polypropylene Fibers for Concrete*, SP-81, American Concrete Institute, Detroit, 1982, pp. 375-396.

1.10 ACI Committee 544, "Revision of State-of-the-Art Report (ACI 544 TR-73) on Fiber Reinforced Concrete," ACI JOURNAL, Proceedings, Nov. 1973, Vol. 70, No. 11, pp. 727-744.

1.11 RILEM Technical Committee 19-FRC, "Fibre Concrete Materials," *Materials and Structures*, Test Res., Vol. 10, No. 56, 1977, pp. 103-120.

1.12 PCI Committee on Glass Fiber Reinforced Concrete Panels, "Recommended Practice for Glass Fiber Reinforced Concrete Panels," Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, 1993.

1.13 PCI Committee on Glass Fiber Reinforced Concrete Panels, "Manual for Quality Control for Plants and Production of Glass Fiber Reinforced Concrete Products," *MNL* 130-91, Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, 1991.

1.14 *Steel Fiber Concrete*, edited by S. P. Shah and A. Skarendahl, Elsevier Applied Science Publishers, Ltd., 1986, 520 pp.

1.15 *Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications*, edited by S. P. Shah and G. B. Batson, SP-105, American Concrete Institute, Detroit, 1987, 597 pp.

1.16 *Thin-Section Fiber Reinforced Concrete and Ferrocement*, edited by J. I. Daniel and S. P. Shah, SP-124, American Concrete Institute, Detroit, 1990, 441 pp.

1.17 Lankard, D. R., "Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON)," *Concrete International*, Vol. 6, No. 12, Dec. 1984, pp. 44-47.

CHAPTER 2—STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE (SFRC)

2.1—Introduction

Steel fiber reinforced concrete (SFRC) is concrete made of hydraulic cements containing fine or fine and coarse aggregate and discontinuous discrete steel fibers. In tension, SFRC fails only after the steel fiber breaks or is pulled out of the cement matrix. shows a typical fractured surface of SFRC.

Properties of SFRC in both the freshly mixed and hardened state, including durability, are a consequence of its composite nature. The mechanics of how the fiber reinforcement strengthens concrete or mortar, extending from the elastic precrack state to the partially plastic post-cracked state, is a continuing research topic. One approach to the mechanics of SFRC is to consider it a composite material whose properties can be related to the fiber properties (volume percentage, strength, elastic modulus, and a fiber bonding parameter of the fibers), the concrete properties (strength, volume percentage, and elastic modulus), and the properties of the interface between the fiber and the matrix. A more general and current approach to the mechanics of fiber reinforcing assumes a crack arrest mechanism based on fracture mechanics. In this model, the energy to extend a crack and debond the fibers in the matrix relates to the properties of the composite.

Application design procedures for SFRC should follow the strength design methodology described in ACI 544.4R.

Good quality and economic construction with SFRC requires that approved mixing, placing, finishing, and quality control procedures be followed. Some training of the construction trades may be necessary to obtain satisfactory results with SFRC. Generally, equipment currently used for conventional concrete construction does not need to be modified for mixing, placing, and finishing SFRC.

Table 2.1— Recommended combined aggregate gradations for steel fiber reinforced concrete

	Percent Passing for Maximum Size of				
U. S. standard sieve size	$^3/_8$ in. (10 mm)	$^1/_2$ in. (13 mm)	$^3/_4$ in. (19 mm)	1 in. (25 mm)	$1^1/_2$ in. (38 mm)
2 (51 mm)	100	100	100	100	100
$1^1/_2$ (38 mm)	100	100	100	100	85-100
1 (25 mm)	100	100	100	94-100	65-85
$^3/_4$ (19 mm)	100	100	94-100	76-82	58-77
$^1/_2$ (13 mm)	100	93-100	70-88	65-76	50-68
$^3/_8$ (10 mm)	96-100	85-96	61-73	56-66	46-58
#4 (5 mm)	72-84	58-78	48-56	45-53	38-50
#8 (2.4 mm)	46-57	41-53	40-47	36-44	29-43
#16 (1.1 mm)	34-44	32-42	32-40	29-38	21-34
#30 (600 μ m)	22-33	19-30	20-32	19-28	13-27
#50 (300 μ m)	10-18	8-15	10-20	8-20	7-19
#100 (150 μ m)	2-7	1-5	3-9	2-8	2-8
#200 (75 μ m)	0-2	0-2	0-2	0-2	0-2



Fig. 2.1—Fracture surface of SFRC

SFRC has advantages over conventional reinforced concrete for several end uses in construction. One example is the use of steel fiber reinforced shotcrete (SFRS) for tunnel lining, rock slope stabilization, and as lagging for the support of excavation. Labor normally used in placing mesh or reinforcing bars in these applications may be eliminated. Other applications are presented in this report.

2.1.1—*Definition of fiber types*

Steel fibers intended for reinforcing concrete are defined as short, discrete lengths of steel having an aspect ratio (ratio of length to diameter) from about 20 to 100, with any of several cross-sections, and that are sufficiently small to be randomly dispersed in an unhardened concrete mixture using usual mixing procedures.

ASTM A 820 provides a classification for four general types of steel fibers based upon the product used in their manufacture:

Type I—Cold-drawn wire.

Type II—Cut sheet.

Type III—Melt-extracted.

Type IV—Other fibers.

The Japanese Society of Civil Engineers (JSCE) has classified steel fibers based on the shape of their cross-section:

Type 1—Square section.

Type 2—Circular section.

Type 3—Crescent section.

The composition of steel fibers generally includes carbon steel (or low carbon steel, sometimes with alloying constituents), or stainless steel. Different applications may require different fiber compositions.

2.1.2—*Manufacturing methods for steel fibers*

Round, straight steel fibers are produced by cutting or chopping wire, typically wire having a diameter between 0.010 and 0.039 in. (0.25 to 1.00 mm). Flat, straight steel fibers having typical cross sections ranging from 0.006 to 0.025 in. (0.15 to 0.64 mm) thickness by 0.010 to 0.080 in. (0.25 to 2.03 mm) width are produced by shearing sheet or flattening wire (Fig 2.2a). Crimped and deformed steel fibers have been produced with both full-length crimping (Fig. 2.2b), or bent or enlarged at the ends only (Fig. 2.2c,d). Some fibers have been deformed by bending or flattening to increase mechanical bonding. Some fibers have been collated into bundles to facilitate handling and mixing. During mixing, the bundles separate into individual fibers (Fig. 2.2c). Fibers are also produced from cold drawn wire that has been shaved down in order to make steel wool. The remaining wires have a circular segment cross-section and may be crimped to produce deformed fibers. Also available are steel fibers made by a machining process that produces elongated chips. These fibers have a rough, irregular surface and a crescent-shaped cross section (Fig. 2.2e).

Steel fibers are also produced by the melt-extraction process. This method uses a rotating wheel that contacts a molten metal surface, lifts off liquid metal, and rapidly solidifies it into fibers. These fibers have an irregular surface, and crescent shaped cross-section (Fig. 2.2f).

2.1.3—*History*

Research on closely-spaced wires and random metallic fibers in the late 1950s and early 1960s was the basis for a patent on SFRC based on fiber spacing [2.1-2.3]. The Portland Cement Association (PCA) investigated fiber reinforcement in the late 1950s [2.4]. Principles of composite materials were applied to analyze fiber reinforced concrete [2.5, 2.6]. The addition of fibers was shown to increase toughness much more than the first crack strength in these tests [2.6]. Another patent based on bond and the aspect ratio of the fibers was granted in 1972 [2.3]. Additional data on patents are documented in Reference 2.7. Since the time of these original fibers, many new steel fibers have been produced.

Applications of SFRC since the mid-1960s have included road and floor slabs, refractory materials and concrete products. The first commercial SFRC pavement in the United States was placed in August 1971 at a truck weighing station near Ashland, Ohio [2.8].

The usefulness of SFRC has been aided by other new developments in the concrete field. High-range water-reducing admixtures increase the workability of some harsh SFRC mixtures [2.9] and have reduced supplier and contractor resistance to the use of SFRC. Silica fume and accelerators have enabled steel fiber reinforced shotcrete to be placed in thicker layers. Silica fume also reduces the permeability of the shotcrete material [2.10].

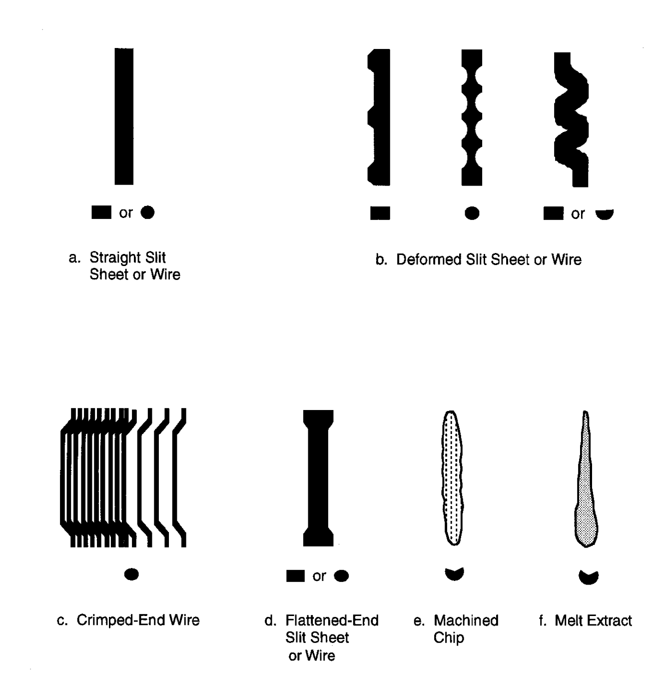


Fig. 2.2—Various steel fiber geometries

2.2—Physical properties

2.2.1—*Fiber properties*

The fiber strength, stiffness, and the ability of the fibers to bond with the concrete are important fiber reinforcement properties. Bond is dependent on the aspect ratio of the fiber. Typical aspect ratios range from about 20 to 100, while length dimensions range from 0.25 to 3 in. (6.4 to 76 mm).

Steel fibers have a relatively high strength and modulus of elasticity, they are protected from corrosion by the alkaline environment of the cementitious matrix, and their bond to the matrix can be enhanced by mechanical anchorage or surface roughness. Long term loading does not adversely influence the mechanical properties of steel fibers. In particular environments such as high temperature refractory applications, the use of stainless steel fibers may be required. Various grades of stainless steel, available in fiber form, respond somewhat differently to exposure to elevated temperature and potentially corrosive environments [2.11]. The user should consider all these factors when designing with steel fiber reinforced refractory for specific applications.

ASTM A 820 establishes minimum tensile strength and bending requirements for steel fibers as well as tolerances for length, diameter (or equivalent diameter), and aspect ratio. The minimum tensile yield strength required by ASTM A 820 is 50,000 psi (345 MPa), while the JSCE Specification requirement is 80,000 psi (552 MPa).

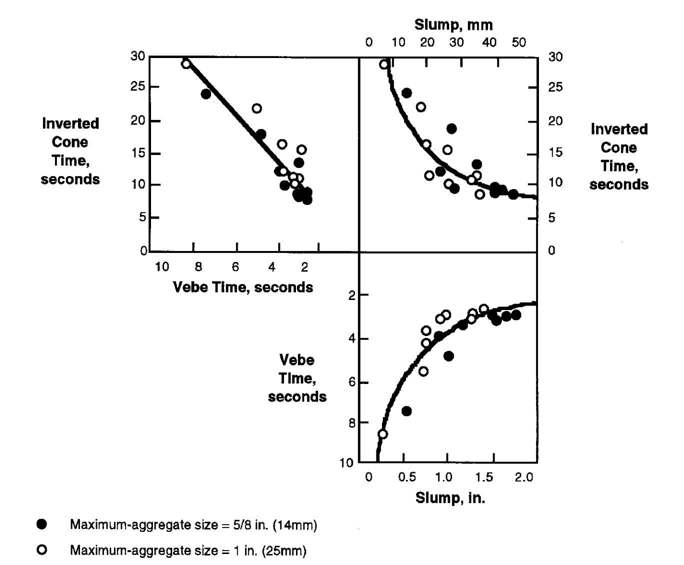


Fig. 2.3—Relationship between slump, vebe time, and inverted cone time

2.2.2—*Properties of freshly-mixed SFRC*

The properties of SFRC in its freshly mixed state are influenced by the aspect ratio of the fiber, fiber geometry, its volume fraction, the matrix proportions, and the fiber-matrix interfacial bond characteristics [2.12].

For conventionally placed SFRC applications, adequate workability should be insured to allow placement, consolidation, and finishing with a minimum of effort, while providing uniform fiber distribution and minimum segregation and bleeding. For a given mixture, the degree of consolidation influences the strength and other hardened material properties, as it does for plain concrete.

In the typical ranges of volume fractions used for cast-in-place SFRC (0.25 to 1.5 volume percent), the addition of steel fibers may reduce the measured slump of the composite as compared to a non-fibrous mixture in the range of 1 to 4 in. (25 to 102 mm). Since compaction by mechanical vibration is recommended in most SFRC applications, assessing the workability of a SFRC mixture with either the Vebe consistometer, as described in the British Standards Institution Standard BS 1881, or by ASTM C 995 Inverted Slump-Cone Time is recommended rather than the conventional slump measurement. A typical relationship between slump, Vebe time, and Inverted Slump-Cone time is shown in Fig. 2.3 [2.13]. Studies have established that a mixture with a relatively low slump can have good consolidation properties under vibration [2.14]. Slump loss characteristics with time for SFRC and non-fibrous concrete are similar [2.15]. In addition to the above considerations, the balling of fibers must be avoided. A collection of long thin steel fibers with an aspect ratio greater than 100 will, if shaken together, tend to interlock to form a mat, or ball, which is very difficult to separate by vibration alone. On the other hand, short fibers with an aspect ratio less than 50 are not able to interlock and can easily be dispersed by vibration [2.16]. However, as shown in Section 2.2.3, a high aspect ratio is desired for many improved mechanical properties in the hardened state.

The tendency of a SFRC mixture to produce balling of fibers in the freshly mixed state has been found to be a function of the maximum size and the overall gradation of the aggregate used in the mixture, the aspect ratio of the fibers, the volume fraction, the fiber shape, and the method of introducing the fibers into the mixture. The larger the maximum size aggregate and aspect ratio, the less volume fraction of fibers can be added without the tendency to ball. Guidance for determining the fiber sizes and volumes to achieve adequate hardened composite properties, and how to balance these needs against the mix proportions for satisfactory freshly mixed properties is given in Section 2.3.

2.2.3—*Properties of the hardened composite*

2.2.3.1 *Behavior under static loading*—The mechanism of fiber reinforcement of the cementitious matrix in concrete has been extensively studied in terms of the resistance of the fibers to pullout from the matrix resulting from the breakdown of the fiber-matrix interfacial bond. Attempts have been made to relate the bond strength to the composite mechanical properties of SFRC [2.17-2.27]. As a consequence of the gradual nature of fiber pullout, fibers impart post-crack ductility to the cementitious matrix that would otherwise behave and fail in a brittle manner.

Improvements in ductility depend on the type and volume percentage of fibers present [2.28-2.30]. Fibers with enhanced resistance to pullout are fabricated with a crimped or wavy profile, surface deformations, or improved end anchorage provided by hooking, teeing or end enlargement (spade or dog bone shape). These types are more effective than equivalent straight uniform fibers of the same length and diameter. Consequently, the amount of these fibers required to achieve a given level of improvement in strength and ductility is usually less than the amount of equivalent straight uniform fibers [2.31-2.33].

Steel fibers improve the ductility of concrete under all modes of loading, but their effectiveness in improving strength varies among compression, tension, shear, torsion, and flexure.

2.2.3.1.1 *Compression*—In compression, the ultimate strength is only slightly affected by the presence of fibers, with observed increases ranging from 0 to 15 percent for up to 1.5 percent by volume of fibers [2.34-2.38].

2.2.3.1.2 *Direct tension*—In direct tension, the improvement in strength is significant, with increases of the order of 30 to 40 percent reported for the addition of 1.5 percent by volume of fibers in mortar or concrete [2.38, 2.39].

2.2.3.1.3 *Shear and torsion*—Steel fibers generally increase the shear and torsional strength of concrete, although there are little data dealing strictly with the shear and torsional strength of SFRC, as opposed to that of reinforced beams made with a SFRC matrix and conventional reinforcing bars. The increase in strength of SFRC in pure shear has been

shown to depend on the shear testing technique and the consequent degree of alignment of the fibers in the shear failure zone [2.40]. For one percent by volume of fibers, the increases range from negligible to 30 percent [2.40].

Research has substantiated increased shear (diagonal tension) capacity of SFRC and mortar beams [2.41-2.44]. Steel fibers have several potential advantages when used to augment or replace vertical stirrups in beams [2.45]. These advantages are: (1) the random distribution of fibers throughout the volume of concrete at much closer spacing than is practical for the smallest reinforcing bars which can lead to distributed cracking with reduced crack size; (2) the first-crack tensile strength and the ultimate tensile strength of the concrete may be increased by the fibers; and (3) the shear-friction strength is increased by resistance to pull-out and by fibers bridging cracks.

Steel fibers in sufficient quantity, depending on the geometric shape of the fiber, can increase the shear strength of the concrete beams enough to prevent catastrophic diagonal tension failure and to force a flexure failure of the beam [2.44, 2.46-2.48]. Fig. 2.4 shows shear strength as a function of the shear span-to-depth ratio, a/d, for SFRC beams from several published investigations. The bulk of existing test data for shear capacity of SFRC beams are for smaller than prototype-size beams. Limited test data for prototype-size beams indicate that the steel fibers remain effective as shear reinforcement [2.49, 2.50]. The slight decrease in beam shear strength observed in these tests can be explained by the decrease in shear strength with beam size observed for beams without fiber reinforcement.

2.2.3.1.4 *Flexure*—Increases in the flexural strength of SFRC are substantially greater than in tension or compression because ductile behavior of the SFRC on the tension side of a beam alters the normally elastic distribution of stress and strain over the member depth. The altered stress distribution is essentially plastic in the tension zone and elastic in the compression zone, resulting in a shift of the neutral axis toward the compression zone [2.16]. Although early studies [2.2] gave the impression that the flexural strength can be more than doubled with about 4 percent by volume of fibers in a sand-cement mortar, it is now recognized that the presence of coarse aggregate coupled with normal mixing and placing considerations limits the maximum practical fiber volume in concrete to 1.5 to 2.0 percent. A summary of corresponding strength data [2.34] shows that the flexural strength of SFRC is about 50 to 70 percent more than that of the unreinforced concrete matrix in the normal third-point bending test [2.35, 2.36, 2.51, 2.52]. Use of higher fiber volume fractions, or center-point loading, or small specimens and long fibers with significant fiber alignment in the longitudinal direction will produce greater percentage increases up to 150 percent [2.34, 2.53-2.56]. At lower fiber volume concentrations, a significant increase in flexural strength may not be realized using beam specimens.

2.2.3.2 *Behavior under impact loading*—To characterize the behavior of concrete under impact loading, the two most important parameters are the strength and the fracture energy. The behavior of concrete reinforced with various types of steel fibers and subjected to impact loads induced by explosive charges, drop-weight impact machines, modified Charpy machines, or dynamic tensile and compressive loads, has been measured in a variety of ways [2.31, 2.32, 2.57-2.68]. Two types of comparisons may be made:

1. Differences between SFRC and plain concrete under impact loading; and

2. Differences between the behavior of SFRC under impact loading and under static loading.

In terms of the differences between SFRC and plain concrete under flexural impact loading, it has been found [2.63-2.66] that for normal strength concrete the peak loads for SFRC were about 40 percent higher than those obtained for the plain matrix. For high strength concrete, a similar improvement in the peak load was observed. Steel fibers increased the fracture energy under impact by a factor of about 2.5 for normal strength concrete and by a factor of about 3.5 for high strength concrete. However, the improvement observed in the peak load and the fracture energy under impact in some cases was considerably smaller than that obtained in static loading, possibly because of the increased fiber fractures that occurred under impact loading. In comparing the behavior of SFRC under impact loading to its behavior under static loading, steel fibers increased the peak loads by a factor of 2 to 3 times for normal strength concrete, and by a factor of about 1.5 for high strength concrete. Steel fibers increased the fracture energies by a factor of about 5 for normal strength concrete and by a factor of about 4 for high strength concrete.

2.2.3.3 *Fatigue behavior*—Experimental studies show that, for a given type of fiber, there is a significant increase in flexural fatigue strength with increasing percentage of steel fibers [2.31, 2.69-2.72]. The specific mix proportion, fiber type, and fiber percentage for an application in question should be compared to the referenced reports. Depending on the fiber type and concentration, a

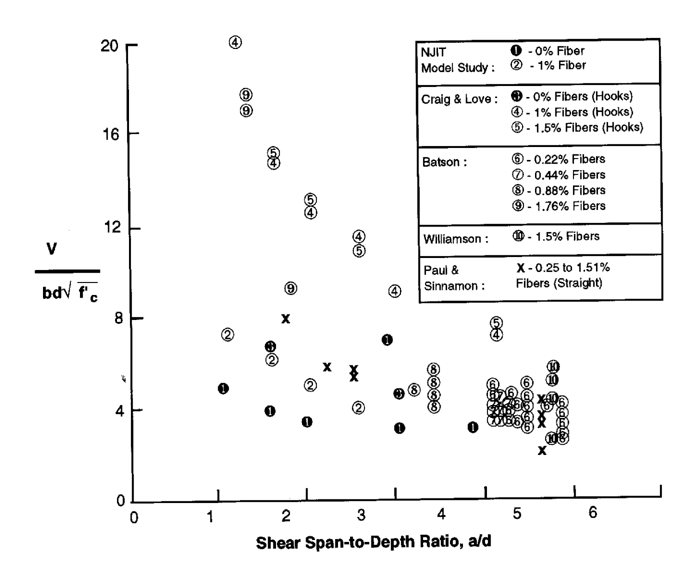
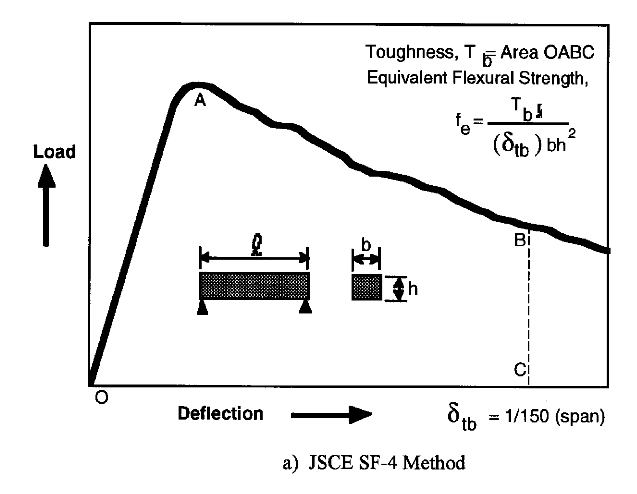
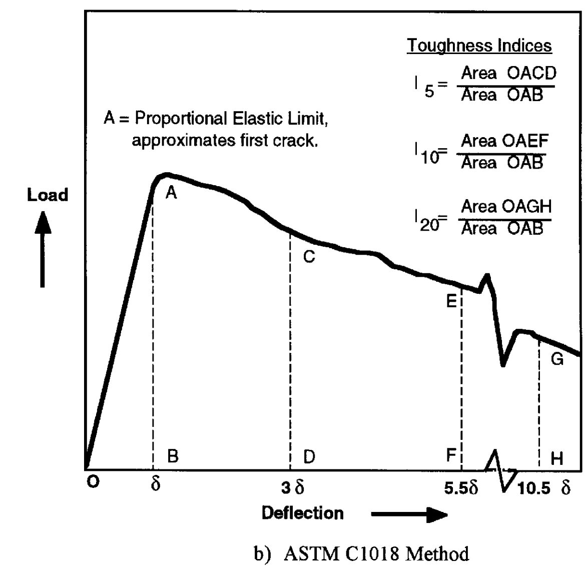


Fig. 2.4—Shear behavior of reinforced SFRC beams



a) JSCE SF-4 Method



b) ASTM C1018 Method

Fig. 2.5—Schematic of load-deflection curves and toughness parameters

properly designed SFRC mixture will have a fatigue strength of about 65 to 90 percent of the static flexural strength at 2 million cycles when nonreversed loading is used [2.72, 2.73], with slightly less fatigue strength when full reversal of load is used [2.71].

It has been shown that the addition of fibers to conventionally reinforced beams increases the fatigue life and decreases the crack width under fatigue loading [2.70]. It has also been shown that the fatigue strength of conventionally reinforced beams made with SFRC increases. The resulting deflection changes accompanying fatigue loading also decrease [2.74]. In some cases, residual static flexural strength has been 10 to 30 percent greater than for similar beams with no fatigue history. One explanation for this increase is that the cyclic loading reduces initial residual tensile stresses caused by shrinkage of the matrix [2.75].

2.2.3.4 *Creep and shrinkage*—Limited test data [2.15, 2.76, 2.77] indicate that steel wire fiber reinforcement at volumes less than 1 percent have no significant effect on the creep and free shrinkage behavior of portland cement mortar and concrete.

2.2.3.5 *Modulus of elasticity and Poisson's ratio*—In practice, when the volume percentage of fibers is less than 2 percent, the modulus of elasticity and Poisson's ratio of SFRC are generally taken as equal to those of a similar non-fibrous concrete or mortar.

2.2.3.6 *Toughness*—Early in the development of SFRC, toughness was recognized as the characteristic that most clearly distinguishes SFRC from concrete without steel fibers [2.78, 2.79]. Under impact conditions, toughness can be qualitatively demonstrated by trying to break through a section of SFRC with a hammer. For example, a steel fiber reinforced mortar pot withstands multiple hammer blows before a hole is punched at the point of impact. Even then, the rest of the pot retains its structural integrity. In contrast, a similar pot made of mortar without steel fibers fractures into several pieces after a single hammer blow, losing its structural integrity.

Under slow flexure conditions, toughness can be qualitatively demonstrated by observing the flexural behavior of simply supported beams [2.80]. A concrete beam containing steel fibers suffers damage by gradual development of single or multiple cracks with increasing deflection, but retains some degree of structural integrity and post-crack resistance even with considerable deflection. A similar beam without steel fibers fails suddenly at a small deflection by separation into two pieces.

These two simple manifestations of toughness serve not only to identify the characteristic of toughness in a qualitative sense, but also exemplify the two categories of testing techniques for quantifying toughness; namely, techniques involving either high-rate single or multiple applications of load, or a single slow-rate application of load.

The preferred technique for determining toughness of SFRC is by flexural loading. This reflects the stress condition in the majority of applications such as paving, flooring, and shotcrete linings. Slow flexure is also preferable for determining toughness because the results are lower bound values, safe for use in design. Other fully instrumented tests are often so complex that the time and cost are prohibitive [2.80]. In the standardized slow flexure methods, JSCE SF-4 and ASTM C 1018, a measure of toughness is derived from analysis of the load-deflection curve as indicated in Fig. 2.5. Details of these methods along with a discussion of their merits and drawbacks are presented in References 2.80, 2.81, and 2.82. These test methods provide specifiers and designers with a method to specify and test for toughness levels appropriate to their applications. As an example, for SFRC tunnel linings, I_5 and I_{10} toughness indices sometimes have been specified. Also, toughness indices and residual strength factors corresponding to higher end-point deflections as well as minimum flexural strength requirements as described in ASTM C 1018 are also being used. The JSCE SF-4 equivalent flexural strength is sometimes used as an alternate to design methods based on first-crack strength for slab-on-grade design.

2.2.3.7 *Thermal conductivity*—Small increases in the thermal conductivity of steel fiber reinforced mortar with 0.5 to 1.5 percent by volume of fiber were found with increasing fiber content [2.83].

2.2.3.8 *Abrasion resistance*—Steel fibers have no effect on abrasion resistance of concrete by particulate debris carried in slowly flowing water. However, under high velocity flow producing cavitation conditions and large impact forces caused by the debris, SFRC has significantly improved resistance to disintegration [2.31, 2.57, 2.83-2.86]. Abrasion resistance as it relates to pavement and slab wear under wheeled traffic is largely unaffected by steel fibers. Standard abrasion tests (ASTM C 779-Procedure C) on field and laboratory samples confirm this observation [2.87].

2.2.3.9 *Friction and skid resistance*—Static friction, skid, and rolling resistance of SFRC and identical plain concrete cast into laboratory-size slab samples were compared in a simulated skid test [2.88]. The SFRC had $^3/_8$ in. (9.5 mm) maximum size aggregates. Test results showed that the coefficient of static friction for dry concrete surfaces, with no wear, erosion, or deterioration of the surface, was independent of the steel fiber content. After simulated abrasion and erosion of the surface, the steel fiber reinforced surfaces had up to 15 percent higher skid and rolling resistance than did plain concrete under dry, wet, and frozen surface conditions.

2.2.4—*Durability*

2.2.4.1 *Freezing and thawing*—All the well-known practices for making durable concrete apply to SFRC. For freezing and thawing resistance, the same air content criteria should be used as is recommended in ACI 201. Exposure tests have generally revealed that for freezing and thawing resistance, SFRC must be air-entrained [2.89]. Air void characteristics of SFRC and non-fibrous concrete are similar in nature, supporting the above hypothesis [2.15].

2.2.4.2 *Corrosion of fibers: crack-free concrete*—Experience to date has shown that if a concrete has a 28-day compressive strength over 3000 psi (21 MPa), is well compacted, and complies with ACI 318 recommendations for water-cement ratio, then corrosion of fibers will be limited to the surface skin of the concrete. Once the surface fibers corrode, there does not seem to be a propagation of the corrosion much more than 0.10 in. (2.5 mm) below the surface. This limited surface corrosion seems to exist even when the concrete is highly saturated with chloride ions [2.90]. Since the fibers are short, discontinuous, and rarely touch each other, there is no continuous conductive path for stray or induced currents or currents from electromotive potential between different areas of the concrete.

Limited experience is available on fiber corrosion in applications subjected to thermal cycling. Short length fibers do not debond under thermal cycling, although such debonding can occur with conventional bar or mesh reinforcement. Since the corrosion mechanism occurs in debonded areas, SFRC has improved durability over conventional reinforced concrete for this application.

2.2.4.3 *Corrosion of fibers: cracked concrete*—Laboratory and field testing of cracked SFRC in an environment containing chlorides has indicated that cracks in concrete can lead to corrosion of the fibers passing across the crack [2.91]. However, crack widths of less than 0.1 mm (0.004 in.) do not allow corrosion of steel fibers passing across the crack [2.92]. If the cracks wider than 0.1 mm (0.004 in.) are limited in depth, the consequences of this localized corrosion may not always be structurally significant. However, if flexural or tensile cracking of SFRC can lead to a catastrophic structural condition, full consideration should be given to the possibility of corrosion at cracks.

Most of the corrosion testing of SFRC has been performed in a saturated chloride environment, either experimentally in the laboratory or in a marine tidal zone. Corrosion behavior of SFRC in aggressive non-saturated environment or in fresh water exposure is limited. Based on the tests in chloride environments and the present knowledge of corrosion of reinforcement, it is prudent to consider that in most potentially aggressive environments where cracks in SFRC can be expected, corrosion of carbon steel fibers passing through the crack will occur to some extent.

To reduce the potential for corrosion at cracks or surface staining, the use of alloyed carbon steel fibers, stainless steel fibers, or galvanized carbon steel fibers are possible alternatives. Precautions for the use of galvanized steels in concrete must be observed as outlined in ACI 549.

2.2.5—*Shrinkage cracking*

Concrete shrinks when it is subjected to a drying environment. The extent of shrinkage depends on many factors including the properties of the materials, temperature and relative humidity of the environment, the age when concrete is subjected to the drying environment, and the size of the concrete mass. If concrete is restrained from shrinkage, then tensile stresses develop and concrete may crack. Shrinkage cracking is one of the more common causes of cracking for walls, slabs, and pavements. One of the methods to reduce the adverse effects of shrinkage cracking is reinforcing the concrete with short, randomly distributed, steel fibers.

Since concrete is almost always restrained, the tendency for cracking is common. Steel fibers have three roles in such situations: (1) they allow multiple cracking to occur, (2) they allow tensile stresses to be transferred across cracks, i.e., the composite maintains residual tensile strength even if shrinkage cracks occur, and (3) stress transfer can occur for a long time, permitting healing/sealing of the cracks [2.91].

There is no standard test to assess cracking due to restrained shrinkage. A suitable test method is necessary to evaluate the efficiency of different types and amounts of fibers. ASTM C 157 recommends the use of a long, prismatic specimen to measure free shrinkage. If it is assumed that the length of the specimen is much larger than the cross-sectional dimensions, then the observation of the change in length with time can provide a measure of one-dimensional shrinkage. If this long-prismatic specimen is restrained from shrinking, then uniaxial tensile stresses are produced. If a restrained shrinkage test is carried out such that essentially uniform, uniaxial tensile stresses are produced, then such a test is somewhat similar to a uniaxial tensile test.

Table 2.2— Range of proportions for normal weight steel fiber reinforced concrete

Mix parameters	3/8 in. maximum-size aggregate	3/4 in. maximum-size aggregate	1 1/2 in. maximum-size aggregate
Cement, lb/yd^3	600-1000	500-900	470-700
w/c Ratio	0.35-0.45	0.35-0.50	0.35-0.55
Percent of fine to coarse aggregate	45-60	45-55	40-55
Entrained air content, percent	4-8	4-6	4-5
Fiber content, vol. percent			
Deformed fiber	0.4-1.0	0.3-0.8	0.2-0.7
Smooth fiber	0.8-2.0	0.6-1.6	0.4-1.4

An alternate simple approach is to use ring-type specimens as discussed in References 2.76, 2.77, and 2.93 through 2.96. While the addition of steel fibers may not reduce the total amount of restrained shrinkage, it can increase the number of cracks and thus reduce the average crack widths. Some results for SFRC ring-type specimens are shown in Fig. 2.6. It can be seen that the addition of even a small amount (0.25 vol. percent) of straight, smooth steel fibers 1 inch long and 0.016 inches in diameter (25 mm by 0.4 mm in diameter) can reduce the average crack width significantly (1/5 the value of the plain concrete specimen).

2.3—Preparation technologies

Mixing of SRFC can be accomplished by several methods, with the choice of method depending on the job requirements and the facilities available. It is important to have a uniform dispersion of the fibers and to prevent the segregation or balling of the fibers during mixing.

Balling of the fibers during mixing is related to a number of factors. The most important factors appear to be the aspect ratio of the fibers, the volume percentage of fibers, the maximum size and gradation of the aggregates, and the method of adding the fibers to the mixture. As the first three of these factors increase, the tendency for balling increases. Refer to ACI 544.3R, “Guide For Specifying, Mixing, Placing, and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete” for additional information.

2.3.1—*Mix proportions*

Compared to conventional concrete, some SFRC mixtures are characterized by higher cement content, higher fine aggregate content, and decreasing slump with increasing fiber content. Since consolidation with mechanical vibration is recommended in most SFRC applications, assessing the workability of a SFRC mixture with ASTM C 995 Inverted Slump-Cone Time or the Vebe test is recommended rather than the conventional slump measurement.

Conventional admixtures and pozzolans are commonly used in SFRC mixtures for air entrainment, water reduction, workability, and shrinkage control. A mix proportioning procedure that has been used for paving and structural applications and in the repair of hydraulic structures is described in References 2.84 and 2.97. Test results indicate that lightweight SFRC can be formulated with minor modifications [2.98]. Also, experience has shown that if the combined fine and coarse aggregate gradation envelopes as shown in Table 2.1 are met, the tendency to form fiber balls is minimized and workability is enhanced [2.99, 2.100]. Alternatively, a mixture based on experience, such as those shown in Table 2.2, can be used for a trial mix. Once a mixture has been selected, it is highly advisable that a full field batch be processed prior to actual start of construction with the mixing equipment that will be used for the project. Recommendations for trial mixes and the maximum fiber content for good workability are available from the steel fiber manufacturers.

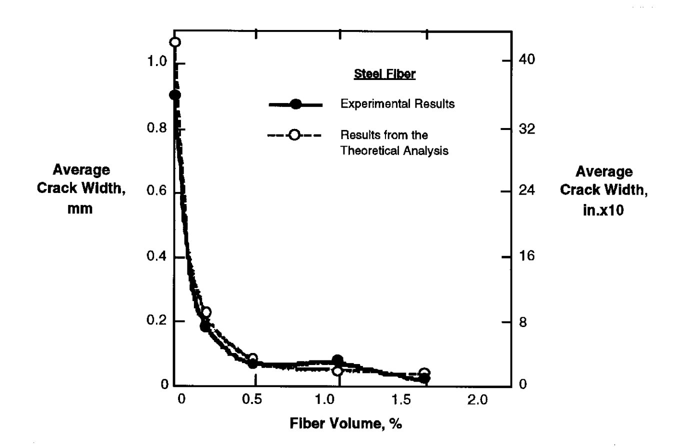


Fig. 2.6—Average crack width versus fiber volume



Fig. 2.7—Adding steel fibers to a loaded mixer truck via conveyor



Fig. 2.8—Adding steel fibers via conveyor onto charging conveyor in a batch plant



Fig. 2.9—Adding steel fibers to weigh batcher via conveyor belt

2.3.2 —*Mixing methods*

It is very important that the fibers be dispersed uniformly throughout the mixture. This must be done during the batching and mixing phase. Several mixing sequences have been successfully used, including the following:

1. Add the fibers to the truck mixer after all other ingredients, including the water, have been added and mixed. Steel fibers should be added to the mixer hopper at the rate of about 100 lbs (45 kg) per minute, with the mixer rotating at full speed. The fibers should be added in a clump-free state so that the mixer blades can carry the fibers into the mixer. The mixer should then be slowed to the recommended mixing speed and mixed for 40 to 50 revolutions. Steel fibers have been added manually by emptying the containers into the truck hopper, or via a conveyor belt or blower as shown in. Using this method, steel fibers can be added at the batch plant or on the job site.
2. Add the fibers to the aggregate stream in the batch plant before the aggregate is added to the mixer. Steel fibers can be added manually on top of the aggregates on the charging conveyor belt, or via another conveyor emptying onto the charging belt as shown in Fig. 2.8. The fibers should be spread out along the conveyor belt to prevent clumping.
3. Add the fibers on top of the aggregates after they are weighed in the batcher. The normal flow of the aggregates out of the weigh batcher will distribute the fibers throughout the aggregates. Steel fibers can be added manually or via a conveyor as shown in Fig. 2.9.

SFRC delivered to projects should conform to the applicable provisions of ASTM C 1116. For currently used manual steel fiber charging methods, workers should be equipped with protective gloves and goggles. It is essential that tightly bound fiber clumps be broken up or prevented from entering the mix. It is recommended that the method of introducing the steel fibers into the mixture be proven in the field during a trial mix.

2.4—Theoretical modeling

It is well recognized that the tensile behavior of concrete matrices can be improved by the incorporation of fibers. Depending upon the fiber geometry and the fiber type, a number of failure mechanisms can be achieved. In general, analytical models are formulated on the basis of one or more of these mechanisms of failure. It is therefore relevant to describe the primary types of failure mechanisms in fiber reinforced concrete composites.

Similar to the behavior of plain concrete, composite failure under most types of loading is initiated by the tensile cracking of the matrix along planes where the normal tensile strains exceed the ultimate values. This may be followed by multiple cracking of the matrix prior to composite fracture, if the fibers are sufficiently long (or continuous). However, when short strong fibers are used (steel, glass, etc.), once the matrix has cracked, one of the following types of failure will occur:

1. The composite fractures immediately after matrix cracking. This results from inadequate fiber content at the critical section or insufficient fiber lengths to transfer stresses across the matrix crack.
2. The composite continues to carry decreasing loads after the peak. The post-cracking resistance is primarily attributed to fiber pull-out. While no significant increase in composite strength is observed, considerable enhancement of the composite fracture energy and toughness is obtained, as is shown in Fig. 2.10. This toughness allows cracks in indeterminate structures to work as hinges and to redistribute loads. In this way, the failure load of the structure may be substantially higher than for the unreinforced structure although the flexural strength of the plain concrete, tested on beams, is not increased.
3. The composite continues to carry increasing loads after matrix cracking. The peak load-carrying capacity of the composite and the corresponding deformation are significantly greater than that of the unreinforced matrix. During the pre-peak inelastic regime of the composite response, progressive deb-

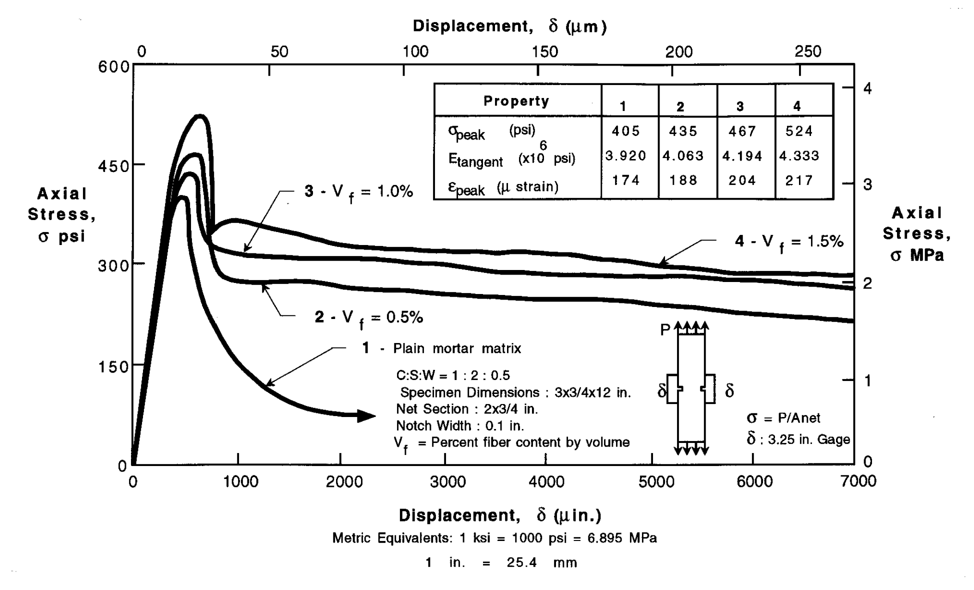


Fig. 2.10—Typical results of stress-displacement curves obtained from direct tension tests on plain mortar matrix and SFRC

onding and softening of the interface may be responsible for the energy absorption processes. It is clear that this mode of composite failure is essentially the same as for type 2, but provides higher failure loads and controlled crack growth.

Based in part on the fundamental approach in their formulation, analytical models can be categorized [2.101] as: models based on the theory of multiple fracture, composite models, strain-relief models, fracture mechanics models, interface mechanics models, and micromechanics models. Fairly exhaustive reviews of these models are available elsewhere [2.101, 2.102]. Brief reviews of the fracture mechanics models and the interface mechanics models are given here, as these are typically the most suitable for modeling the inelastic processes in short-fiber composites.

Two broad categories of models can be identified from the fracture mechanics-based models. The more fundamental class of models uses the concepts of linear elastic fracture mechanics (LEFM) to solve the problem of crack initiation, growth, arrest, and stability in the presence of fibers through appropriate changes in the stress intensity factor [2.1, 2.2]. Typically these models assume perfect bond between the fiber and the matrix, and are one-parameter fracture models. Unlike the classical LEFM models, some of the later models implicitly account for the inelastic interface response during crack growth in such composites through a nonlinear stress-displacement relationship for the fiber-bridging zone (process zone). This approach, which has come to be known as the fictitious crack model (FCM) [2.102], is conceptually similar to that described earlier for the fracture of unreinforced concrete. The major differences in the fictitious crack models [2.103, 2.106] are the singularity assumptions at the crack-tip, the criteria used for crack initiation and growth, and the stability of the crack growth.

Others [2.107] have proposed a fracture mechanics model to predict the crack propagation resistance of fiber reinforced concrete that is somewhat different from either of these two approaches. Fracture resistance in fibrous composites according to this model is separated into the following four regimes: linear elastic behavior of the composite; subcritical crack growth in the matrix and the beginning of the fiber bridging effect; post-critical crack growth in the matrix such that the net stress intensity factor due to the applied load and the fiber bridging closing stresses remain constant (steady state crack growth); and the final stage where the resistance to crack separation is provided exclusively by the fibers. The model uses two parameters to describe the matrix fracture properties (K_{S1C}, modified critical stress intensity factor based on LEFM and the effective crack length, and CTOD, the critical crack tip opening displacement, as described earlier for unreinforced concrete), and a fiber pull-out stress-crack-width relationship as the basic input information.

All of the fictitious crack models rely on the stress-crack-width relations obtained experimentally. There have been some attempts at predicting the macroscopic stress-crack-width relations of the composite from a study of the mechanics of the fiber-matrix interface [2.24, 2.108-2.113]. They can be grouped as models based on the shear-lag theory or modifications thereof [2.108-2.110, 2.113], fracture mechanics based interface models [2.24, 2.113], and numerical models [2.24, 2.112] Many of these models have been successful to varying degrees in predicting the peak pull-out loads [2.24, 2.108-2.113] and the load-slip response [2.110, 2.112, 2.113-2.115] of idealized aligned single fiber pull-out. These models have been very useful in understanding the basic mechanics of stress transfer at the interface and showing that the interface softening and debonding play an important role in the fracture of such composites. However, significant research efforts will be

needed to modify these models to predict the pull-out characteristics of the inclined fibers that are randomly oriented at a matrix crack (randomness in both the angular orientation as well as the embedment length).

2.5—Design considerations

The designer may best view SFRC as a concrete with increased strain capacity, impact resistance, energy absorption, fatigue endurance, and tensile strength. The increase in these properties will vary from nil to substantial, depending on the quantity and type of fibers used. However, composite properties will not usually increase directly with the volume of fibers added.

Several approaches to the design and sizing of members with SFRC are available. These are based on conventional design methods generally supplemented by special procedures for the fiber contribution. Additional information on design considerations may be found in ACI 544.4R, "Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete." These methods generally account for the tensile contribution of the SFRC when considering the internal forces in the member. When supported by full scale test data, these approaches can provide satisfactory designs. The major differences in the proposed methods is in the determination of the magnitude of the tensile stress increase due to the fibers and the manner in which the total force is calculated. Another approach is to consider cracks as plastic hinges in which the remaining moment capacity depends on the type and quantity of fibers present. Other approaches that have been used are often empirical and may apply only in certain cases where limited supporting test data have been obtained. They should be used with caution in new applications, and only after adequate investigation.

Generally, for flexural structural components, steel fibers should be used in conjunction with properly designed continuous reinforcement. Steel fibers can reliably confine cracking and improve resistance to material deterioration as a result of fatigue, impact, and shrinkage or thermal loads. A conservative but reasonable approach for structural members where flexural or tensile loads occur such as in beams, columns, or elevated slabs (roofs, floors, or other slabs not on grade) is that reinforcing bars must be used to resist the total tensile load. This is because the variability of fiber distribution may be such that low fiber content in critical areas could lead to unacceptable reduction in strength.

In applications where the presence of continuous tensile reinforcement is not essential to the safety and integrity of the structure, such as floors on grade, pavements, overlays, ground support, and shotcrete linings, the improvements in flexural strength, impact resistance, toughness, and fatigue performance associated with the fibers can be used to reduce section thickness, improve performance, or both. For structural concrete, ACI 318 does not provide for use of the additional tensile strength of the fiber reinforced concrete in building design, and therefore the design of reinforcement must still follow the usual procedure. Other applications, as noted above, provide more freedom to take full advantage of the improved properties of SFRC.

There are some applications where steel fibers have been used without reinforcing bars to carry loads. These have been short span, elevated slabs, for example, a parking garage at Heathrow Airport with slabs 3 ft-6 in. (1.07 m) square by $2^1/_2$ in. (10 cm) thick, supported on four sides [2.116]. In such cases, the reliability of the members should be demonstrated by full-scale load tests and the fabrication should employ rigid quality control.

Some full-scale tests have shown that steel fibers are effective in supplementing or replacing the stirrups in beams [2.44, 2.45, 2.117], although supplementing or replacing stirrups with steel fibers is not an accepted practice at present. These full-scale tests have shown that steel fibers in combination with reinforcing bars can also increase the moment capacity of reinforced and prestressed concrete beams [2.44, 2.118, 2.119].

Steel fibers can also provide an adequate internal restraining mechanism when shrinkage-compensating cements are used so that the concrete system will perform its crack control function even when restraint from conventional reinforcement is not provided [2.120]. Guidance concerning shrinkage-compensating concrete is available in ACI 223.

2.6—Applications

The applications of SFRC will depend on the ingenuity of the designer and builder in taking advantage of the static and dynamic tensile strength, energy absorbing characteristics, toughness, and fatigue endurance of this composite material. The uniform dispersion of fiber throughout the concrete provides isotropic strength properties not common to conventionally reinforced concrete.

Present applications of SFRC are discussed in the following sections.

2.6.1— ***Applications of cast-in-place SFRC***

Many cast-in-place SFRC applications involve slabs-on-grade, either in the form of pavements or industrial floors. As early as 1983, twenty-two airport paving projects had been completed in the United States [2.121], and over 20 million square feet (1.9 million square meters) of industrial flooring had been constructed in Europe through 1990 [2.122]. Many other projects, including bridge deck overlays and floor overlays, have been reported [2.8, 2.123].

In 1971, the U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory performed controlled testing of SFRC runway slabs subjected to C5A airplane wheel loadings. Based on this investigation, the Federal Aviation Administration prepared a design guide for steel fibrous concrete for airport pavement applications [2.124]. Analysis of test data indicated that SFRC slabs need to be only about one-half the thickness of plain concrete slabs for the same wheel loads.

An example of SFRC industrial floors is the 796,000 ft^2 (74,000 m^2) Honda Automobile Assembly and Office Build-

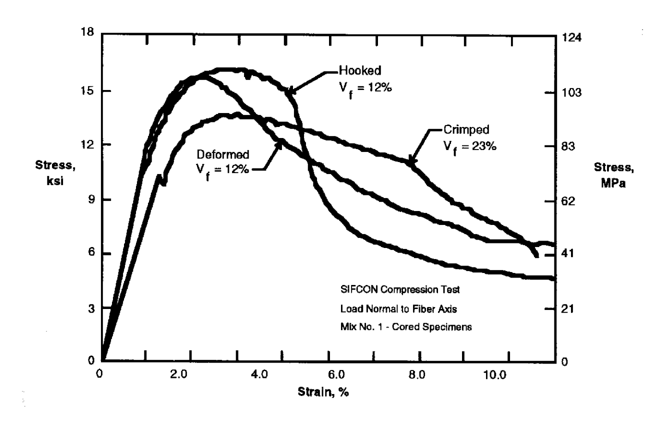


Fig. 2.11—Typical effects of fiber type on the stress-strain curve of SIFCON in compression

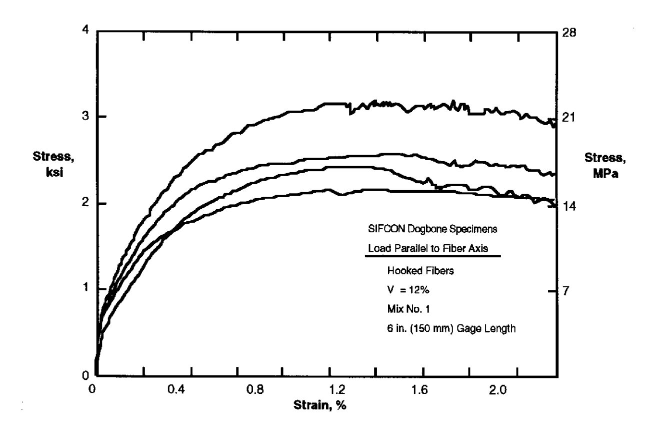


Fig. 2.12—Tensile stress-strain response of hooked fiber SIFCON composites

ing in Alliston, Ontario, Canada, of which 581,000 sq.ft. (54,000 m^2) is slab-on-grade. This slab-on-grade is 6 in. (150 mm) thick and reinforced with 0.25 vol. percent or 33 lbs/yd^3 (20 kgs/m^3) of 2.4 inch long (60 mm) deformed fibers.

Other cast-in-place applications include an impact resistant encasement of a turbine test facility for Westinghouse Electric Corp., Philadelphia, PA [2.126]. SFRC containing 120 lbs/yd^3 (71 kgs/m^3) of 2.0 in. by 0.020 in. diameter (50 mm by 0.50 mm diameter) crimped-end fibers was placed by pumping. Although the concrete encasement included conventional reinforcement, the use of steel fibers reduced the required thickness by one-third.

In 1984, 500,000 ft^2 (46,000 m^2) of 4-in. thick (100 mm) SFRC was placed as a replacement of the upstream concrete facing placed in 1909 at the Barr Lake Dam near Denver, CO [2.127]. The SFRC mixture contained 0.6 vol. percent or 80 lbs/yd^3 (47 kgs/m^3) of 2.4 in. by 0.039 in. diameter (60 mm by 0.80 mm diameter) crimped-end fibers, and $1^1/_2$ in. (38 mm) maximum-size aggregate. The SFRC was pumped to a slip-form screed to pave the 47 ft (14 m) high, 2.5 to 1 slope facing.

Several other applications of cast-in-place SFRC include:

1. Repairs and new construction on major dams and other hydraulic structures to provide resistance to cavitation and severe erosion caused by the impact of large waterborne debris [2.99].

2. Repairs and rehabilitation of marine structures such as concrete piling and caissons [2.88].

3. Bonded overlays in industrial floor and highway rehabilitation [2.128].

4. Slip-formed, cast-in-place tunnel lining [2.129].

5. Latex-modified SFRC bridge deck overlays in Oregon [2.130].

6. Highway paving [2.131].

7. Large, 77,000 ft^2 (7,150 m^2) industrial floor-on-grade [2.132].

8. Roller-compacted concrete (RCC) for pavement construction. Recent work has shown that steel fibers can be incorporated into RCC paving mixes with resulting improvements in material properties [2.133].

9. Bonded overlay repairs to over 50 bridge decks in Alberta, Canada [2.134].

2.6.2—*Applications of precast SFRC*

Many precast applications for SFRC make use of the improvement in properties such as impact resistance or toughness. Other precast applications use steel fibers to replace conventional reinforcement in utility boxes and septic tanks.

Some recent applications are cited:

Dolosse: In 1982 and 1985 30,000 cubic yards (22,900 cubic meters) of SFRC were placed in over 1,500 42 ton (38 MT) dolosse by the Corps of Engineers in Northern California. SFRC was specified in lieu of conventional reinforcing bars to improve the wave impact resistance of the dolosse [2.135].

Vaults and Safes: Since 1984, most of the vault and safe manufacturers in North America have used SFRC in precast panels that are then used to construct vaults. Thicknesses of vault walls have been reduced by up to two-thirds over the cast-in-place method. Steel fiber contents vary from less than 1 volume percent to over 3 volume percent. SFRC is used to increase the impact resistance and toughness of the panels against penetration.

Mine Crib Blocks: These units, made with conventional concrete masonry machines, are routinely supplied throughout the U.S. for building roof support structures in coal mines. Steel fibers are used to increase the compressive toughness of the concrete to allow controlled crushing and thus prevent catastrophic failures [2.136].

Tilt-up Panels: SFRC has been used to replace conventional reinforcement in tilt-up panels up to 24 feet high (7.3 m) [2.137].

Precast Garages: SFRC is used in Europe to precast complete automobile garages for single family residences.

2.6.3—*Shotcrete*

Steel fiber reinforced shotcrete (SFRS) was first used in ground support applications. Its first practical application, a trial use for rock slope stabilization in 1974 along the Snake River, Washington, showed very good results

[2.138, 2.139]. Since that time, many applications have been made in slope stabilization, in ground support for hydroelectric, transportation and mining tunnels, and in soldier pile retaining walls as concrete lagging that is placed as the structure is constructed from the top down [2.140-2.142]. Additional references and more complete information on SFRS may be found in ACI 506.1R.

Besides ground support, SFRS applications include thin-shell hemispherical domes cast on inflation-formed structures [2.143]; artificial rockscapes using both dry-mix and wet-mix steel fiber reinforced silica fume shotcrete [2.144]; houses in England [2.145]; repair and reinforcing of structures such as lighthouses, bridge piers, and abutments [2.146]; channel lining and slope stabilization on the Mt. St. Helens Sediment Control Structure; lining of oil storage caverns in Sweden; resurfacing of rocket flame deflectors at Cape Kennedy, and forming of boat hulls similar to ferrocement using steel fibers alone and fibers plus mesh.

2.6.4 —*SIFCON (Slurry Infiltrated Fiber Concrete)*

Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON) is a type of fiber reinforced concrete in which formwork molds are filled to capacity with randomly-oriented steel fibers, usually in the loose condition, and the resulting fiber network is infiltrated by a cement-based slurry. Infiltration is usually accomplished by gravity flow aided by light vibration, or by pressure grouting.

SIFCON composites differ from conventional SFRC in at least two respects: they contain a much larger volume fraction of fibers (usually 8 to 12 volume percent, but values of up to 25 volume percent have been reported) and they use a matrix consisting of very fine particles. As such, they can be made to simultaneously exhibit outstanding strengths and ductilities.

Several studies have reported on the mechanical properties of SIFCON. While most have dealt with its compressive strength and bending properties [2.147-2.154], three have addressed its tensile, shear, and ductility properties. The following is a summary of current information:

1. Compressive strengths of SIFCON can be made to vary from normal strengths (3 ksi or 21 MPa) to more than 20 ksi (140 MPa) [2.147-2.152]. Higher strengths can be obtained with the use of additives such as fly ash, micro silica, and admixtures.

2. The area under the compressive load-deflection curves for SIFCON specimens divided by the area under load-deflection curves for unreinforced concrete can exceed 50. Strain capacities of more than 10 percent at high stresses have been reported [2.152].

3. Tensile strengths of up to 6 ksi (41 MPa) and tensile strains close to 2 percent have been reported [2.150-2.157].

4. The area under the tensile load-deflection curves for SIFCON specimens divided by the area under load-deflection curves for unreinforced concrete can reach 1000 [2.157].

5. Moduli of rupture in bending of up to 13 ksi (90 MPa) have been reported [2.150-2.155].

6. Shear strengths of more than 4 ksi (28 MPa) have been reported [2.150-2.155].

Examples of stress-strain curves in compression and tension are shown in Figs. 2.11 and 2.12. Since SIFCON is not inexpensive, only applications requiring very high strength and toughness have so far benefitted from its use. These applications include impact and blast resistant structures, refractories, protective revetments, and taxiway and pavement repairs.

2.6.5—*Refractories*

Stainless steel fibers have been used as reinforcement in monolithic refractories since 1970 [2.158]. Steel fiber reinforced refractories (SFRR) have shown excellent performance in a number of refractory application areas including ferrous and nonferrous metal production and processing, petroleum refining applications, rotary kilns used for producing portland cement and lime, coal-fired boilers, municipal incinerators, plus numerous other applications.

Historically, steel fibers have been added to refractory concretes to provide improvements in resistance to cracking and spalling in applications where thermal cycling and thermal shock have limited the service life of the refractory. The presence of the fibers acts to control the cracking in such a way that cracks having relatively large openings are less frequent and crack-plane boundaries are held together by fibers bridging the crack plane.

When viewed in the above manner, the measure of "failure" of a SFRR involves the measure of the amount of work required to separate the fractured surfaces along a crack plane or completely separate cracked pieces of refractory so that material loss (spalling) occurs. A convenient technique to measure this property involves the measurement of a flexural toughness index (ASTM C 1018).

The following applications serve to illustrate where stainless steel fiber reinforcement can provide improved refractory performance. In each case, knowledge of the service environment and the benefits and limitations of stainless steel fiber reinforcement guided the selection and design of the fiber reinforced product.

1. Petrochemical and refinery process vessel linings: In view of the low processing temperatures involved, typically 600 to 1800 F (315 to 982 C), petrochemical and refinery applications appear ideally suited for the reinforcement of refractories with fibers. Steel fiber reinforcement has made it possible to eliminate hex-mesh support and to reduce spalling in various lining situations. Fibers have been used in refractories placed in feed risers and cyclones (the latter in conjunction with abrasion-resistant phosphate-bonded castables).

SFRR is also being used as replacement for dual-layer lining systems. The use of single-layer fiber reinforced refractory eliminates the complex refractory support system in the dual-layer lining which is a source of problems.

Refractories reinforced with steel fibers are currently being specified for cyclones, transfer lines, reactors and regenerators, and for linings in furnaces and combustors. Installation of the refractories by gunning (shotcreting) may

limit the length or aspect ratio of the fibers used here. However, the use of high aspect ratio and/or long fibers will provide improved life at the same fiber level or equal life at lower fiber levels (relative to shorter, lower aspect ratio fibers).

The recent discovery that very high fiber levels (4 to 8 percent by volume) can contribute to improved erosion/abrasion resistance in refractories may stimulate increased interest for applications in the petrochemical and refining industry [2.144].

2. Rotary kilns: Fiber reinforced refractories are being used throughout many areas of rotary kilns including the nose ring, chain section, lifters, burner tube, preheater cyclones, and coolers. The use of fibers has extended the life of the refractory to two or three times that of conventional refractory.

3. Steel production: Stainless steel fibers are used in many steel mill applications. Some of the more notable applications include injection lances for iron and steel desulfurizing, arches, lintels, doors, coke oven door plugs, blast furnace cast house floors, reheat furnaces, boiler houses, cupolas, ladles, tundishes, troughs, and burner blocks.

2.7—Research needs

1. Development of rational design procedures to incorporate the properties of SFRC in structural or load-carrying members such as beams, slabs-on-grade, columns, and beam-column joints that will be adopted by code writing bodies such as ACI 318.

2. Development of numerical models for SFRC for one, two, and three dimensional states of stress and strain.

3. Development of material damage and structural stiffness degradation models for large strains and high strain rates to relate or predict SFRC response to stress or shock waves, impact, explosive, and earthquake impulse loadings.

4. Investigation of ductility characteristics of SFRC for potential application in seismic design and construction.

5. Investigation of mechanical and physical properties of SFRC at low temperatures.

6. Investigation of mechanical and physical properties of SFRC using high strength matrix.

7. Investigation of the influence of steel fibers on plastic and drying shrinkage of concrete and shotcrete.

8. Investigation of coatings for steel fibers to modify bond with the matrix and to provide corrosion protection.

9. Development of steel fiber reinforced chemical-bonded ceramic composites including Macro-Defect Free (MDF) cement composites.

10. Investigation of the use of steel fibers in hydraulic non-portland cement concrete.

11. Investigation of interface mechanics and other micro-mechanisms involved in the pull-out of steel fibers not aligned in the loading direction and steel fibers that are deformed.

2.8—Cited references

2.1 Romualdi, James P., and Batson, Gordon B., "Mechanics of Crack Arrest in Concrete," *Proceedings*, ASCE, Vol. 89, EM3, June 1963, pp. 147-168.

2.2 Romualdi, James P., and Mandel, James A., "Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed Closely Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement," ACI JOURNAL, *Proceedings*, Vol. 61, No. 6, June 1964, pp. 657-671.

2.3 Patent No. 3,429,094 (1969), and No. 3,500,728 (1970) to Battelle Memorial Institute, Columbus, Ohio, and Patent No. 3,650,785 (1972) to U.S. Steel Corporation, Pittsburgh, Pennsylvania, United States Patent Office, Washington, D.C.

2.4 Monfore, G. E., "A Review of Fiber Reinforcement of Portland Cement Paste, Mortar, and Concrete," *Journal*, PCA Research and Development Laboratories, Vol. 10, No. 3, Sept. 1968, pp. 36-42.

2.5 Shah, S. P., and Rangan, B. V., "Fiber Reinforced Concrete Properties," ACI JOURNAL, *Proceedings*, Vol. 68, No. 2, Feb. 1971, pp. 126-135.

2.6 Shah, S. P., and Rangan, B. V., "Ductility of Concrete Reinforced with Stirrups, Fibers and Compression Reinforcement," *Journal*, Structural Division, ASCE, Vol. 96, No. ST6, 1970, pp. 1167-1184.

2.7 Naaman, A. E., "Fiber Reinforcement for Concrete," *Concrete International: Design and Construction*, Vol. 7, No. 3, Mar. 1985, pp. 21-25.

2.8 Hoff, George C., "Use of Steel Fiber Reinforced Concrete in Bridge Decks and Pavements," *Steel Fiber Concrete,* Elsevier Applied Sciences Publishers, Ltd., 1986, pp. 67-108.

2.9 Ramakrishnan, V.; Coyle, W. V. ; Kopac, Peter A. ; and Pasko, Thomas J., Jr., "Performance Characteristics of Steel Fiber Reinforced Superplasticized Concrete," *Developments in the Use of Superplasticizers,* SP-68, American Concrete Institute, Detroit, 1981, pp. 515-534.

2.10 Morgan, D. R., et.al., "Evaluation of Silica Fume Shotcrete," *Proceedings,* CANMET/CSCE International Workshop on Silica Fume in Concrete, Montreal, May 1987.

2.11 Lankard, D. R., and Sheets, H. D., "Use of Steel Wire Fibers in Refractory Castables," *The American Ceramic Society Bulletin,* Vol. 50, No. 5, May 1971, pp. 497-500.

2.12 Ramakrishnan, V., "Materials and Properties of Fibre Concrete," *Proceedings of the International Symposium on Fibre Reinforced Concrete*, Dec. 1987, Madras, India, Vol. 1, pp. 2.3-2.23.

2.13 Johnston, Colin D., "Measures of the Workability of Steel Fiber Reinforced Concrete and Their Precision," *Cement, Concrete and Aggregates,* Vol. 6, No. 2, Winter 1984, pp. 74-83.

2.14 Balaguru, P., and Ramakrishnan, V., "Comparison of Slump Cone and V-B Tests as Measures of Workability for Fiber Reinforced and Plain Concrete," *ASTM Journal, Cement, Concrete and Aggregates,* Vol. 9, Summer 1987, pp. 3-11.

2.15 Balaguru, P., and Ramakrishnan, V., "Properties of Fiber Reinforced Concrete: Workability Behavior Under Long Term Loading and Air-Void Characteristics," *ACI Materials Journal,* Vol. 85, No. 3, May-June 1988, pp. 189-196.

2.16 Hannant, D. J., *Fibre Cements and Fibre Concretes,* John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, United Kingdom, 1978, p. 53.

2.17 Shah, S. P., and McGarry, F. J., "Griffith Fracture Criteria and Concrete," *Engineering Mechanics Journal*, ASCE, Vol. 97, No. EM6, Dec. 1971, pp. 1663-1676.

2.18 Shah, S. P., "New Reinforcing Materials in Concrete Construction," ACI JOURNAL, *Proceedings*, Vol. 71, No. 5, May 1974, pp. 257-262.

2.19 Shah, S. P., "Fiber Reinforced Concrete," *Handbook of Structural Concrete,* edited by Kong, Evans, Cohen, and Roll, McGraw-Hill, 1983.

2.20 Naaman, A. E., and Shah, S. P., "Bond Studies of Oriented and Aligned Fibers," *Proceedings,* RILEM Symposium on Fiber Reinforced Concrete, London, Sept. 1975, pp. 171-178.

2.21 Naaman, A. E., and Shah, S. P., "Pullout Mechanism in Steel Fiber Reinforced Concrete," *ASCE Journal,* Structural Division, Vol. 102, No. ST8, Aug. 1976, pp. 1537-1548.

2.22 Shah, S. P., and Naaman, A. E., "Mechanical Properties of Steel and Glass Fiber Reinforced Concrete," ACI JOURNAL, *Proceedings*, Vol. 73, No. 1, Jan. 1976, pp. 50-53.

2.23 Stang, H., and Shah, S. P., "Failure of Fiber Reinforced Composites by Pullout Fracture," *Journal of Materials Science,* Vol. 21, No. 3, Mar. 1986, pp. 953-957.

2.24 Morrison, J.; Shah, S. P.; and Jeng, Y. S., "Analysis of the Debonding and Pullout Process in Fiber Composites," *Engineering Mechanics Journal,* ASCE, Vol. 114, No. 2, Feb. 1988, pp. 277-294.

2.25 Gray, R. J., and Johnston, C. D., "Measurement of Fibre-Matrix Interfacial Bond Strength in Steel Fibre Reinforced Cementitious Composites," *Proceedings,* RILEM Symposium of Testing and Test Methods of Fibre Cement Composites, Sheffield, 1978, Construction Press, Lancaster, 1978, pp. 317-328.

2.26 Gray, R. J., and Johnston, C. D., "The Effect of Matrix Composition on Fibre/Matrix Interfacial Bond Shear Strength in Fibre-Reinforced Mortar," *Cement and Concrete Research*, Pergamon Press, Ltd., Vol. 14, 1984, pp. 285-296.

2.27 Gray, R. J., and Johnston, C. D., "The Influence of Fibre/Matrix Interfacial Bond Strength on the Mechanical Properties of Steel Fibre-Reinforced-Mortars," *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete,* Vol. 9, No. 1, Feb. 1987, pp. 43-55.

2.28 Johnston, Colin D., and Coleman, Ronald A., "Strength and Deformation of Steel Fiber Reinforced Mortar in Uniaxial Tension," *Fiber Reinforced Concrete,* SP-44, American Concrete Institute, Detroit, 1974, pp. 177-207.

2.29 Anderson, W. E., "Proposed Testing of Steel-Fibre Concrete to Minimize Unexpected Service Failures," *Proceedings,* RILEM Symposium of Testing and Test Methods of Fibre Cement Composites (Sheffield, 1978), Construction Press, Lancaster, 1978, pp. 223-232.

2.30 Johnston, C. D., "Definitions and Measurement of Flexural Toughness Parameters for Fiber Reinforced Concrete," ASTM, *Cement, Concrete and Aggregates,* Vol. 4, No. 2, Winter 1982, pp. 53-60.

2.31 Brandshaug, T.; Ramakrishnan, V.; Coyle, W. V.; and Schrader, E. K., "A Comparative Evaluation of Concrete Reinforced with Straight Steel Fibers and Collated Fibers with Deformed Ends." *Report* No. SDSM&T-CBS 7801, South Dakota School of Mines and Technology, Rapid City, May 1978, 52 pp.

2.32 Balaguru, P., and Ramakrishnan, V., "Mechanical Properties of Superplasticized Fiber Reinforced Concrete Developed for Bridge Decks and Highway Pavements," *Concrete in Transportation,* SP-93, American Concrete Institute, Detroit, 1986, pp. 563-584.

2.33 Johnston, C. D., and Gray, R. J., "Flexural Toughness First-Crack Strength of Fibre-Reinforced-Concrete Using ASTM Standard C 1018," *Proceedings,* Third International Symposium on Developments in Fibre Reinforced Cement Concrete, RILEM, Sheffield, July l, 1986, Paper No. 5.1.

2.34 Johnston, C. D., "Steel Fibre Reinforced Mortar and Concrete—A Review of Mechanical Properties," *Fiber Reinforced Concrete*, SP-44, American Concrete Institute, Detroit, 1974, pp. 127-142.

2.35 Dixon, J., and Mayfield, B., "Concrete Reinforced with Fibrous Wire," *Journal of the Concrete Society,* Concrete, Vol. 5, No. 3, Mar. 1971, pp. 73-76.

2.36 Kar, N. J., and Pal, A. K., "Strength of Fiber Reinforced Concrete," *Journal of the Structural Division*, Proceedings, ASCE, Vol. 98, No. ST-5, May 1972, pp. 1053-1068.

2.37 Chen, W., and Carson, J. L., "Stress-Strain Properties of Random Wire Reinforced Concrete," ACI JOURNAL, *Proceedings*, Vol. 68, No. 12, Dec. 1971, pp. 933-936.

2.38 Williamson, G. R., *The Effect of Steel Fibers on the Compressive Strength of Concrete,* SP-44: Fiber Reinforced Concrete, American Concrete Institute, Detroit, 1974, pp. 195-207.

2.39 Johnston, C. D., and Gray, R. J., "Uniaxial Tension Testing of Steel Fibre Reinforced Cementitious Composites," *Proceedings,* International Symposium on Testing and Test Methods of Fibre-Cement Composites, RILEM, Sheffield, Apr. 1978, pp. 451-461.

2.40 Barr, B., "The Fracture Characteristics of FRC Materials in Shear," *Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications,* SP-105, American Concrete Institute, Detroit, 1987, pp. 27-53.

2.41 Batson, Gordon B., "Use of Steel Fibers for Shear Reinforcement and Ductility," *Steel Fiber Concrete,* Elsevier Applied Science Publishers, Ltd., 1986, pp. 377-399.

2.42 Umoto, Kabayashi, and Fujino, "Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams with Steel Fibers as Shear Reinforcement," *Transactions of the Japan Concrete Institute,* Vol. 3, 1981, pp. 245-252.

2.43 Narayanan, R., and Darwish, I. Y. S., "Use of Steel Fibers as Shear Reinforcement," *ACI Structural Journal,* Vol. 84, No. 3, May-June 1987, pp. 216-227.

2.44 Jindal, Roop L., "Shear and Moment Capacities of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams," *Fiber Reinforced Concrete—International Symposium,* SP-81, American Concrete Institute, Detroit, 1984, pp. 1-16.

2.45 Williamson, G. R., "Steel Fibers as Web Reinforcement in Reinforced Concrete," *Proceedings* US Army Science Conference, West Point, Vol. 3, June 1978, pp. 363-377.

2.46 Jindal, Roop L., and Hassan, K. A., "Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Beam-Column Connections," *Fiber Reinforced Concrete—International Symposium,* SP-81, American Concrete Institute, Detroit, 1984, pp. 107-123.

2.47 Sood, V., and Gupta, S., "Behavior of Steel Fibrous Concrete Beam Column Connections," *Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications*, SP-105, American Concrete Institute, Detroit, 1987, pp. 437-474.

2.48 Jindal, R., and Sharma, V., "Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Knee Type Connections," *Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications,* SP-105, American Concrete Institute, Detroit, 1987, pp. 475-491.

2.49 Williamson, G. R., and Knab, L. I., "Full Scale Fibre Concrete Beam Tests," *Fiber Reinforced Cement and Concrete,* RILEM Symposium 1975, Construction Press, Lancaster, England, 1975, pp. 209-214.

2.50 Narayanan, R., and Darwish, I. Y. S., "Fiber Concrete Deep Beams in Shear," *ACI Structural Journal,* Vol. 85, No. 2, Mar.-Apr. 1988, pp. 141-149.

2.51 Shah, S. P., and Rangan, R. V., "Fiber Reinforced Concrete Properties," ACI JOURNAL, *Proceedings,* Vol. 68, No. 2, Feb. 1971, pp. 126-135.

2.52 Works, R. H., and Untrauer, R. E., Discussion of "Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed and Closely Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement," ACI JOURNAL, *Proceedings,* Vol. 61, No. 12, Dec. 1964, pp. 1653-1656.

2.53 Snyder, M. L., and Lankard, D. R., "Factors Affecting the Strength of Steel Fibrous Concrete," ACI JOURNAL, *Proceedings*, Vol. 69, No. 2, Feb. 1972, pp. 96-100.

2.54 Waterhouse, B. L., and Luke, C. E., "Steel Fiber Optimization," *Conference Proceedings* M-28, "Fibrous Concrete—Construction Material for the Seventies," Dec. 1972, pp. 630-681.

2.55 Lankard, D. R., "Flexural Strength Predictions," *Conference Proceedings* M-28, "Fibrous Concrete—Construction Material for the Seventies," Dec. 1972, pp. 101-123.

2.56 Johnston, C. D., "Effects on Flexural Performance of Sawing Plain Concrete and of Sawing and Other Methods of Altering Fiber Alignment in Fiber Reinforced Concrete," *Cement, Concrete and Aggregates,* ASTM, CCAGDP, Vol. 11, No. 1, Summer 1989, pp. 23-29.

2.57 Houghton, D. L.; Borge, O. E.; Paxton, J. A., "Cavitation Resistance of Some Special Concretes," ACI JOURNAL, *Proceedings*, Vol. 75, No. 12, Dec. 1978, pp. 664-667.

2.58 Suaris, W., and Shah, S. P., "Inertial Effects in the Instrumented Impact Testing of Cement Composites," *Cement, Concrete and Aggregates,* Vol. 3, No. 2, Winter 1981, pp. 77-83.

2.59 Suaris, W., and Shah, S. P., "Test Methods for Impact Resistance of Fiber Reinforced Concrete," *Fiber Reinforced Concrete—International Symposium,* SP-81, American Concrete Institute, Detroit, 1984, pp. 247-260.

2.60 Suaris, W., and Shah, S. P., "Properties of Concrete and Fiber Reinforced Concrete Subjected to Impact Loading," *Journal*, Structural Division, ASCE, Vol. 109, No. 7, July 1983, pp. 1717-1741.

2.61 Gopalaratnam, V., and Shah, S. P., "Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete Subjected to Impact Loading," ACI JOURNAL, *Proceedings*, Vol. 83, No. 1, Jan-Feb. 1986, pp. 117-126.

2.62 Gopalaratnam, V.; Shah, S. P.; and John, R., "A Modified Instrumented Impact Test of Cement Composites," *Experimental Mechanics*, Vol. 24, No. 2, June 1986, pp. 102-110.

2.63 Banthia, N. P., "Impact Resistance of Concrete," Ph.D. Thesis, University of British Columbia, Vancouver, B.C., 1987.

2.64 Banthia, N.; Mindess, S.; and Bentur, A., "Impact Behavior of Concrete Beams," *Materials and Structures*, Vol. 20, 1987, pp. 293-302.

2.65 Banthia, N.; Mindess, S.; and Bentur, A., "Behavior of Fiber Reinforced Concrete Beams under Impact Loading," *Proceedings* of the 6th International Conference on Composite Materials (ICCM-VI), London, July 1987.

2.66 Banthia, N.; Mindess, S.; and Bentur, A., "Steel Fiber Reinforced Concrete under Impact," *Proceedings* of International Symposium on Fiber Reinforced Concrete (ISFRC-87), Madras, India, 1987, pp. 4.29-4.39.

2.67 Naaman, A. E., and Gopalaratnam, V. S., "Impact Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete in Bending," *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete,* Vol. 5, No. 4, Nov. 1983, pp. 225-233.

2.68 Namur, G. G., and Naaman, A. E., "Strain Rate Effects on Tensile Properties of Fiber Reinforced Concrete," *Cement Based Composites: Strain Rate Effects on Fracture*, S. Mindess and S. P. Shah, eds., Material Research Society, Pittsburgh, MRS Vol. 64, 1986, pp. 97-118.

2.69 Zollo, Ronald F., "Wire Fiber Reinforced Concrete Overlays for Orthotropic Bridge Deck Type Loadings," ACI JOURNAL, *Proceedings*, Vol. 72, No. 10, Oct. 1975, pp. 576-582.

2.70 Kormeling, H. A.; Reinhardt, H. W.; and Shah, S. P., "Static and Fatigue Properties of Concrete Beams Reinforced with Continuous Bars and with Fibers," ACI JOURNAL, *Proceedings*, Vol. 77, No. 1, Jan.-Feb. 1980, pp. 36-43.

2.71 Batson, G.; Ball. C.; Bailey, L.; Landers, E.; and Hooks, J., "Flexural Fatigue Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams," ACI JOURNAL, *Proceedings*, Vol. 69, No. 11, Nov. 1972, pp. 673-677.

2.72 Ramakrishnan, V., and Josifek, Charles, "Performance Characteristics and Flexural Fatigue Strength on Concrete Steel Fiber Composites," *Proceedings of the International Symposium on Fibre Reinforced Concrete*, Dec. 1987, Madras, India, pp. 2.73-2.84.

2.73 Ramakrishnan, V.; Oberling, G.; and Tatnall, P., "Flexural Fatigue Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete," *Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications,* SP-105, American Concrete Institute, Detroit, 1987, pp. 225-245.

2.74 Schrader, E. K., "Studies in the Behavior of Fiber Reinforced Concrete," MS Thesis, Clarkson College of Technology, Potsdam, 1971.

2.75 Romualdi, James P., "The Static Cracking Stress and Fatigue Strength of Concrete Reinforced with Short Pieces of Steel Wire," *International Conference on the Structure of Concrete,* London, England, 1965.

2.76 Grzybowski, M., and Shah, S. P., "Shrinkage Cracking in Fiber Reinforced Concrete," *ACI Materials Journal,* Vol. 87, No. 2, Mar.-Apr. 1990, pp. 138-148.

2.77 Malmberg, B., and Skarendahl, A., "Method of Studying the Cracking of Fibre Concrete under Restrained Shrinkage," *Proceedings,* RILEM Symposium on Testing and Test Methods of Fibre Cement Composites, Sheffield, 1978, Construction Press, Lancaster, 1978, pp. 173-179.

2.78 Shah, S. P., and Winter, George, "Inelastic Behavior and Fracture of Concrete," ACI JOURNAL, *Proceedings*, Vol. 63, No. 9, Sept. 1966, pp. 925-930.

2.79 Edgington, J.; Hannant, D. J.; and Williams, R. I. T., "Steel Fibre Reinforced Concrete," *Current Paper* No. CP69/74, Building Research Establishment, Garston, Watford, 1974, 17 pp.

2.80 Johnston, Colin D., "Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete," *Steel Fiber Concrete,* Elsevier Applied Science Publishers, Ltd., 1986, pp. 333-360.

2.81 Nanni, A., "Ductility of Fiber Reinforced Concrete," *Journal of Materials in Civil Engineering,* ASCE, Vol. 3, No. 1, Feb. 1991, pp. 78-90.

2.82 Gopalaratnam, V. S.; Shah, S P.; Batson, G.; Criswell, M.; Ramakrishnan, V.; and Wecharatana, M., "Fracture Toughness of Fiber Reinforced Concrete," *ACI Materials Journal,* Vol. 88, No. 4, July-Aug. 1991, pp. 339-353.

2.83 Cook, D. J., and Uher, C., "The Thermal Conductivity of Fibre-Reinforced Concrete," *Cement and Concrete Research,* Vol. 4, No. 4, July 1974, pp. 497-509.

2.84 Schrader, Ernest K., and Munch, Anthony V., "Fibrous Concrete Repair of Cavitation Damage," *Proceedings,* ASCE, Vol. 102, CO2, June 1976, pp. 385-399.

2.85 Chao, Paul C., "Tarbela Dam—Problems Solved by Novel Concrete," *Civil Engineering,* ASCE, Vol. 50, No. 12, Dec. 1980, pp. 58-64.

2.86 Schrader E. K., and Kaden, R. A., "Outlet Repairs at Dworshak Dam," *The Military Engineer,* Vol. 68, No. 443, May-June 1976, pp. 254-259.

2.87 Nanni, A., "Abrasion Resistance of Roller Compacted Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 86, No. 6, Nov.-Dec. 1988, pp. 559-565.

2.88 Mikkelmeni, M. R., "A Comparative Study of Fiber Reinforced Concrete and Plain Concrete Construction," MS Thesis, Mississippi State University, State College, 1970.

2.89 Balaguru, P., and Ramakrishnan, V., "Freeze-Thaw Durability of Fiber Reinforced Concrete," ACI JOURNAL, *Proceedings,* Vol. 83, No. 3, May-June 1986, pp. 374-382.

2.90 Schupack, M., "Durability of SFRC Exposed to Severe Environments," *Steel Fiber Concrete*, Elsevier Applied Science Publishers, Ltd., 1986, pp. 479-496.

2.91 Hoff, G., "Durability of Fiber Reinforced Concrete in a Severe Marine Environment," *Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications,* SP-105, American Concrete Institute, Detroit, 1987, pp. 997-1041.

2.92 Morse, D. C., and Williamson, G. R., "Corrosion Behavior of Steel Fibrous Concrete," *Report* No. CERL-TR-M-217, Construction Engineering Research Laboratory, Champaign, May 1977, 37 pp.

2.93 Swamy, R. N., and Stavrides, H., "Influence of Fiber Reinforcement on Restrained Shrinkage and Cracking," ACI JOURNAL, *Proceedings*, Vol. 76, No. 3, Mar. 1979, pp. 443-460.

2.94 Grzybowski, M., and Shah, S. P., "Model to Predict Cracking in Fiber Reinforced Concrete Due to Restrained Shrinkage," *Magazine of Concrete Research,* Vol. 41, No. 148, Sept. 1989.

2.95 Krenchel, H., and Shah, S. P., "Restrained Shrinkage Tests with PP-Fiber Reinforced Concrete," *Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications,* SP-105, American Concrete Institute, Detroit, 1987, pp. 141-158.

2.96 Carlson, R. W., and Reading, T. J., "Model Study of Shrinkage Cracking in Concrete Building Walls," *ACI Structural Journal,* Vol. 85, No. 4, July-Aug. 1988, pp. 395-404.

2.97 Schrader, Ernest K., and Munch, Anthony V., "Deck Slab Repaired by Fibrous Concrete Overlay," *Proceedings,* Structural Division, ASCE, Vol. 102, CO1, Mar. 1976, pp. 179-196.

2.98 Balaguru, P., and Ramakrishnan, V., "Properties of Lightweight Fiber Reinforced Concrete," *Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications,* SP-105, American Concrete Institute, Detroit, 1987, pp. 305-322.

2.99 ICOLD *Bulletin* 40, "Fiber Reinforced Concrete," International Commission on Large Dams, 1989, Paris, 23 pp.

2.100 Tatro, Stephen B., "The Effect of Steel Fibers on the Toughness Properties of Large Aggregate Concrete," M.S. Thesis, Purdue University, West Lafayette, Dec. 1985, 113 pp.

2.101 Gopalaratnam, V. S., and Shah, S. P., "Failure Mechanisms and Fracture of Fiber Reinforced Concrete," *Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications,* SP-105, American Concrete Institute, Detroit, 1987, pp. 1-25.

2.102 Mindess, S., "The Fracture of Fibre Reinforced and Polymer Impregnated Concretes: A Review," *Fracture Mechanics of Concrete,* edited by F. H. Wittmann, Elsevier Science Publishers, B. V., Amsterdam, 1983, pp. 481-501.

2.103 Hillerborg, A., "Analysis of Fracture by Means of the Fictitious Crack Model, Particularly for Fiber Reinforced Concrete," *International Journal of Cement Composites,* Vol. 2, No. 4, Nov. 1980, pp. 177-185.

2.104 Petersson, P. E., "Fracture Mechanical Calculations and Tests for Fiber Reinforced Concrete," *Proceedings, Advances in Cement Matrix Composites,* Materials Research Society Annual Meeting, Boston, Nov. 1980, pp. 95-106.

2.105 Wechartana, M., and Shah, S. P., "A Model for Predicting Fracture Resistance of Fiber Reinforced Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 13, No. 6, Nov. 1983, pp. 819-829.

2.106 Visalvanich, K., and Naaman, A. E., "Fracture Model for Fiber Reinforced Concrete," ACI JOURNAL, *Proceedings,* Vol. 80, No. 2, Mar.-Apr. 1982, pp. 128-138.

2.107 Jenq, Y. S., and Shah, S. P., "Crack Propagation in Fiber Reinforced Concrete," *Journal of Structural Engineering,* ASCE, Vol. 112, No. 1, Jan. 1986, pp. 19-34.

2.108 Lawrence, P., "Some Theoretical Considerations of Fibre Pull-Out from an Elastic Matrix," *Journal of Material Science,* Vol. 7, 1972, pp. 1-6.

2.109 Laws, V.; Lawrence, P.; and Nurse, R. W., "Reinforcement of Brittle Matrices by Glass Fibers," *Journal of Physics and Applied Physics,* Vol. 6, 1972, pp. 523-537.

2.110 Gopalaratnam, V. S., and Shah, S. P., "Tensile Failure of Steel Fiber-Reinforced Mortar," *Journal of Engineering Mechanics,* ASCE, Vol. 113, No. 5, May 1987, pp. 635-652.

2.111 Stang, H., and Shah, S. P., "Failure of Fiber Reinforced Composites by Pull-Out Fracture," *Journal of Materials Science,* Vol. 21, No. 3, Mar. 1986, pp. 935-957.

2.112 Sahudin, A. H., "Nonlinear Finite Element Study of Axisymmetric Fiber Pull-Out," M.S. Thesis, University of Missouri-Columbia, July 1987, 110 pp.

2.113 Gopalaratnam, V. S., and Cheng, J., "On the Modeling of Inelastic Interfaces in Fibrous Composites," *Bonding in Cementitious Composites,* S. Mindess and S. P. Shah, eds., Materials Research Society, Boston, Vol. 114, Dec. 1988, pp. 225-231.

2.114 Namur, G. G. and Naaman, A. E., "A Bond Stress Model for Fiber Reinforced Concrete Based on Bond Stress Slip Relationship," *ACI Materials Journal*, Vol. 86, No. 1, Jan.-Feb. 1989, pp. 45-57.

2.115 Naaman, A. E.; Namur, G. G.; Alwan, J.; and Najm, H., "Analytical Study of Fiber Pull-Out and Bond Slip: Part 1. Analytical Study; Part 2. Experimental Validation," *ASCE Journal of Structural Engineering,* Vol. 117, No. 9, Sept. 1991.

2.116 "Wire-Reinforced Precast Concrete Decking Panels," *Precast-Concrete*, (UK), Dec. 1971, pp. 703-708.

2.117 Sharma, A. K., "Shear Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams," ACI JOURNAL, *Proceedings*, Vol. 83, No. 4, July-Aug. 1986, pp. 624-628.

2.118 Henager, C. H., and Doherty, T. J., "Analysis of Reinforced Fibrous Concrete Beams," *Journal*, Structural Division, ASCE, Vol. 12, No. ST1, Paper No. 11847, Jan. 1976.

2.119 Balaguru, P., and Ezeldin, A., "Behavior of Partially Prestressed Beams Made Using High Strength Fiber Reinforced Concrete," *Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications,* SP-105, American Concrete Institute, Detroit, 1987, pp. 419-436.

2.120 Paul, B. K.; Polivka, M.; and Metha, P. K., "Properties of Fiber Reinforced Shrinkage-Compensating Concrete," ACI JOURNAL, *Proceedings*, Vol. 78, No. 6, Nov.-Dec. 1981, pp. 488-492.

2.121 Lankard, D. R., and Schrader, E. K., "Inspection and Analysis of Curl in Steel Fiber Reinforced Concrete Airfield Pavements," Bekaert Corp., Marietta, Apr. 1983, 9 pp.

2.122 Robinson, C.; Colasanti, A.; and Boyd, G., "Steel Fiber Reinforced Auto Assembly Plant Floor," *Concrete International,* Vol. 13, No. 4, Apr. 1991, pp. 30-35.

2.123 Schrader, E. K., "Fiber Reinforced Concrete Pavements and Slabs—A State-of-the-Art Report," *Steel Fiber Concrete,* Elsevier Applied Science Publishers, Ltd., 1986, pp. 109-131.

2.124 Parker, F., Jr., "Steel Fibrous Concrete For Airport Pavement Applications," *FAA-RD-74-31*, National Technical Information Service AD/A-003-123, Springfield, Nov. 1974, 207 pp.

2.125 Hubler, R. L., Jr., "Steel Fiber Reinforced Concrete Floor," *Engineering Digest*, Apr. 1986, pp. 32-33.

2.126 Tatnall, P. C., "Steel Fibrous Concrete Pumped for Burst Protection," *Concrete International: Design and Construction,* Vol. 6, No. 12, Dec. 1984, pp. 48-51.

2.127 Rettberg, William A., "Steel-Reinforced Concrete Makes Older Dam Safer, More Reliable," *Hydro-Review,* Spring 1986, pp. 18-22.

2.128 Bagate, Moussa; McCullough, Frank; and Fowler, David, "Construction and Performance of an Experimental Thin-Bonded Concrete Overlay Pavement in Houston," *TRB Record* 1040, 1985, 9 pp.

2.129 Jury, W. A., "In-site Concrete Linings—Integrating the Package," *Tunnels and Tunnelling,* July 1982, pp. 27-33.

2.130 "Bridge Deck Overlay Combines Steel Fiber and Latex," *Civil Engineering*, ASCE, Mar. 1983, pp. 12.

2.131 "Fiber Concrete Put to Road Test in Quebec," *Concrete Products,* June 1985, pp. 29.

2.132 Jantos, Carl, "Paving at the Labs—Cement is Going High-Tech," *Alcoa Engineering News*, Vol. 1, No. 1, Mar. 1987, 1 pp.

2.133 Nanni, A., and Johari, A., "RCC Pavement Reinforced with Steel Fibers," *Concrete International: Design and Construction,* Vol. 11, No. 3, Mar. 1989, pp. 64-69.

2.134 Johnston, C. D., and Carter, P. D., "Fiber Reinforced Concrete and Shotcrete for Repair and Restoration of Highway Bridges in Alberta," *TRB Record,* No. 1226, 1989, pp. 7-16.

2.135 *Engineer Update,* U.S. Army Corps of Engineers, Office of the Chief of Engineers, Washington, D.C., Vol. 8, No. 10, Oct. 1984, 3 pp.

2.136 Mason, Richard H., "Concrete Crib Block Bolster Longwall Roof Support," *Coal Mining & Processing,* Oct. 1982, pp. 58-62.

2.137 "Stack-Cast Sandwich Panels," *Concrete International: Design and Construction,* Vol. 6, No. 12, Dec. 1984, pp. 59-61.

2.138 Kaden, R. A., "Slope Stabilized with Steel Fibrous Shotcrete," *Western Construction*, Apr. 1974, pp. 30-33.

2.139 Henager, C. H., "Steel Fibrous Shotcrete: A Summary of the State-of-the-Art," *Concrete International: Design and Construction,* Vol. 3, No. 1, Jan. 1981, pp. 50-58.

2.140 Morgan, D. R., and McAskill, Neil, "Rocky Mountain Tunnels Lined with Steel Fiber Reinforced Shotcrete," *Concrete International: Design and Construction*, Vol. 6, No. 12, Dec. 1984, pp. 33-38.

2.141 Rose, Don, "Steel Fibers Reinforce Accelerator Tunnel Lining," *Concrete International: Design and Construction,* Vol. 8, No. 7, July 1986, p. 42.

2.142 Pearlman, S. L.; Dolence, R. W.; Czmola, B. I; and Withiam, J. L., "Instrumenting a Permanently Tied-Back Bridge Abutment—Planning, Installation and Performance," *Proceedings*, 5th International Bridge Conference, Pittsburgh, June 1988, pp. 40-50.

2.143 Wilkerson, Bruce M., "Foam Domes, High Performance Environmental Enclosures," *Concrete Construction: Design and Construction,* Vol. 23, No. 7, July 1978, pp. 405-406.

2.144 Morgan, D. R., "Dry-Mix Silica Fume Shotcrete in Western Canada," *Concrete International: Design and Construction*, Vol. 10, No. 1, Jan. 1988, pp. 24-32.

2.145 Edgington, John, "Economic Fibrous Concrete," Conference *Proceedings*, Fiber Reinforced Materials: Design and Engineering Applications, London, Mar. 1977, pp. 129-140.

2.146 Melamed, Assir, "Fiber Reinforced Concrete in Alberta, *Concrete International: Design and Construction*, Vol. 7, No. 3, Mar. 1985, p. 47.

2.147 Lankard, D. R., and Lease, D. H., "Highly Reinforced Precast Monolithic Refractories," *Bulletin,* American Ceramic Society, Vol. 61, No. 7, 1982, pp. 728-732.

2.148 Lankard, D. R., and Newell, J. K., "Preparation of Highly Reinforced Steel Fiber Reinforced Concrete Composites," *Fiber Reinforced Concrete International Symposium,* SP-81, American Concrete Institute, Detroit, 1984, pp. 286-306.

2.149 Lankard, D. R., "Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON): Properties and Applications," *Very High Strength Cement Based Composites,* edited by J. F. Young, Materials Research Society, Pittsburgh, 1985, pp. 227-286.

2.150 Schneider, B.; Mondragon, R.; and Kirst, J., "ISST Structure With SIFCON," AFWL-TR-87-101, New Mexico Engineering Research Institute, *Technical Report for the Air Force Weapons Laboratory*, Kirkland Air Force Base, New Mexico, May 1984, 83 pp.

2.151 Mondragon, R., "Development of Material Properties for Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON)—Compressive Strength," *Technical Report* No. NMERI WA-18 (8.03), New Mexico Engineering Research Institute, Dec. 1985, 394 pp.

2.152 Homrich, J. R., and Naaman, A. E., "Stress-Strain Properties of SIFCON in Compression," *Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications*, SP-105, American Concrete Institute, Detroit, 1987, pp. 283-304.

2.153 Balaguru, P. and Kendzulak, J., "Flexural Behavior of Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON) Made Using Condensed Silica Fume," *Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete*, SP-91, American Concrete Institute, Detroit, 1986, pp. 1216-1229.

2.154 Baggott, R. and Sarandily, A., "Very High Strength Steel Fiber Reinforced Autoclaved Concrete," *Proceedings,* RILEM Third International Symposium on Developments in Fiber Reinforced Cements and Concretes, Sheffield, England, July 1986.

2.155 Balaguru, P., and Kendzulak, J., "Mechanical Properties of Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON)," *Fiber Reinforced Concrete Properties and Applications*, SP-105, American Concrete Institute, Detroit, 1987, pp. 247-268.

2.156 Naaman, A. E., "Advances in High Performance Fiber Reinforced Cement Composites," *Proceedings of IABSEE Symposium on Concrete Structures for the Future,* Paris, 1987, pp. 371-376.

2.157 Naaman, A. E., and Homrich, J. R., "Tensile Stress-Strain Properties of SIFCON," *ACI Materials Journal*, Vol. 86, No. 3, May-June 1989, pp. 244-25.

CHAPTER 3—GLASS FIBER REINFORCED CONCRETE (GFRC)

3.1—Introduction

Much of the original research performed on glass fiber reinforced cement paste took place in the early l960s. This work used conventional borosilicate glass fibers (E-glass) and soda-lime-silica glass fibers (A-glass). The chemical compositions and properties of selected glasses are listed in Tables 3.1 [3.1, 3.2] and 3.2[3.2, 3.3], respectively. Glass compositions of E-glass and A-glass, used as reinforcement, were found to lose strength rather quickly due to the very high alkalinity (pH $\geq$ 12.5) of the cement-based matrix. Consequently, early A-glass and E-glass composites were unsuitable for long-term use [3.4].

Continued research, however, resulted in the development of a new alkali resistant fiber (AR-glass fiber) that provided improved long-term durability. This system was named alkali resistant-glass fiber reinforced concrete (AR-GFRC).

In 1967, scientists of the United Kingdom Building Research Establishment (BRE) began an investigation of alkali resistant glasses. They successfully formulated a glass composition containing 16 percent zirconia that demonstrated a high alkali resistance. Chemical composition and properties of this alkali resistant (AR) glass are given in Tables 3.1 and 3.2, respectively. Patent applications were filed by the National Research Development Corporation (NRDC) for this product [3.5].

The NRDC and BRE discussed with Pilkington Brothers Limited the possibility of doing further work to develop the fibers for commercial production [3.5]. By 1971, BRE and Pilkington Brothers had collaborated and the results of their work were licensed exclusively to Pilkington for commercial production and distribution throughout the world.

Since the introduction of AR-glass in the United Kingdom in 1971 by Cem-FIL, other manufacturers of AR-glass have come into existence. In 1975, Nippon Electric Glass (NEG) Company introduced an alkali resistant glass containing a minimum of 20 percent zirconia [3.3]. In 1973, Owens-Corning Fiberglas introduced an AR-glass fiber. In 1976, Owens-Corning Fiberglas and Pilkington Brothers, Ltd. agreed to produce the same AR-glass formulation to enhance the development of the alkali resistant glass product and related markets. A cross-license was agreed upon. Subsequently, Owens-Corning Fiberglas stopped production of AR-glass fiber in 1984.

Alkali resistant-glass fiber reinforced concrete is by far the most widely used system for the manufacture of GFRC products. Within the last decade, a wide range of applications in the construction industry has been established.

3.2—Fabrication of GFRC material

There are basically two processes used to fabricate GFRC materials. These are the “spray-up” process and the “premix” process.

3.2.1—*Spray-up process*

Since GFRC is principally used in thin sections, it is important that composite GFRC boards have uniform properties in all directions within the plane of the board. Spraying constitutes an effective process of achieving this uniformity. At present, the spray process accounts for the majority of all manufactured GFRC products in the United States. On a world-wide basis, the relation of spray-up to the premix process is more evenly balanced.

Table 3.1— Chemical composition of selected glasses, percent

Component	A-glass	E-glass	Cem-FIL AR-glass	NEG AR-glass
SiO_2	73.0	54.0	62.0	61.0
Na_2O	13.0	—	14.8	15.0
CaO	8.0	22.0	—	—
MgO	4.0	0.5	—	—
K_2O	0.5	0.8	—	2.0
Al_2O_3	1.0	15.0	0.8	—
Fe_2O_3	0.1	0.3	—	—
B_2O_3	—	7.0	—	—
ZrO_2	—	—	16.7	20.0
TiO_2	—	—	0.1	—
Li_2O	—	—	—	1.0

Table 3.2— Properties of selected glasses

Property	A-Glass	E-Glass	Cem-FIL AR-Glass	NEG AR-Glass
Specific gravity	2.46	2.54	2.70	2.74
Tensile strength, ksi	450	500	360	355
Modulus of elasticity, ksi	9400	10,400	11,600	11,400
Strain at break, percent	4.7	4.8	3.6	2.5

Metric equivalent: 1 ksi = 1000 psi = 6.895 MPa

In the spray-up process, cement/sand mortar and chopped glass fibers are simultaneously pre-mixed and deposited from a spray gun onto a mold surface. The GFRC architectural panel industry sets an absolute minimum of four percent AR-glass fibers by weight of total mix as a mandatory quality control requirement [3.7]. The spray-up process can be either manual or automated. Virtually any section shape can be sprayed or cast. This enables architects to design and manufacturers to produce aesthetically pleasing and useful components.

Sprayed GFRC is manufactured in layers. Each complete pass of the spray gun deposits approximately $^3/_{16}$ to $^1/_4$-in. (4 to 6-mm) thickness. A typical $^1/_2$-in. (13-mm) thick panel thus requires two to three complete passes. After each layer is sprayed, the wet composite is roller compacted to ensure that the panel surface will conform to the mold face, to help remove entrapped air, and to aid the coating of glass fibers by cement paste.

Early composite manufacture used a dewatering process to remove the excess mix water that was necessary to achieve a sprayable mix. Dewatering lowers the water-cement ratio and increases the level of compaction. Dewatering involves suction applied to either side of a permeable mold to remove excess water immediately after spraying. The spray-dewatering process is most suited for automation where the composite is transported over a vacuum system using conveyors.

AR-GFRC mix proportions in the late 1960s were primarily composed of only cement, water, and fiber (neat cement mix). When AR-GFRC was introduced commercially in the early 1970s, sand was introduced at weight ratios of one part sand to three parts cement. By the end of the 1970s, some manufacturers were producing AR-GFRC at sand-to-cement ratios of 1-to-2 and as low as 1-to-1 to reduce the amount of volumetric shrinkage. Throughout the 1980s and currently, typical sand-to-cement ratios are 1-to-1. There is currently research underway to investigate AR-GFRC mixes having greater amounts of sand than cement.

For AR-GFRC products, forms are normally stripped on the day following spray-up. Composites are then moist cured until they have attained most of their design strength. Particular attention must be paid to curing. Because of their thin section, AR-GFRC components are susceptible to rapid moisture loss and incomplete strength development if allowed to remain in normal atmospheric conditions. Therefore, to assure adequate strength gain of the cement matrix, a minimum of seven days moist curing has been recommended [3.8]. Also, improper early age curing that leads to excessive drying may result in warping or distortion of the thin GFRC component shape.

The industry requirement of performing a seven-day moist cure created a curing space problem for manufacturers. As a result, many manufacturers were reluctant to perform this necessary moist cure. In the early 1980s, research was conducted by the Portland Cement Association to eliminate the seven-day moist cure in an effort to alleviate the manufacturers' production problems [3.9]. As a result of that research, composites containing at least 5.0 percent polymer solids by total mix volume and having had no moist cure, were shown to develop 28-day Proportional Elastic Limit (PEL) strengths equal to or slightly greater than similar composites containing no polymer and subjected to a seven-day moist cure [3.9]. This indicated that the recommended seven-day moist curing period for AR-GFRC panels could be replaced by the addition of at least 5 percent polymer solids by volume followed by no moist curing, provided a harsh curing environment does not exist (i.e., dry, hot windy weather, or low temperatures).

All of the data published on GFRC from the late 1960s to the mid-1980s was based on composites that were moist cured for seven days and contained no polymer additions. Furthermore, the majority of all published test data up to about 1980 was based on sand-to-cement ratios of 1-to-3.

3.2.2—*Premix process*

The premix process consists of mixing cement, sand, chopped glass fiber, water, and admixtures together into a mortar, using standard mixers, and casting with vibration, press-molding, extruding, or slip-forming the mortar into a product. Manufacturers of AR-glass fiber claim that up to 5 percent by weight of AR-glass fiber can be mixed into a cement and sand mortar without balling [3.5]. Higher concentrations of fiber can be mixed into the mortar using high efficiency undulating mixers. Mixing must be closely controlled to minimize damage to the fiber in the abrasive environment of the mix. Flow aids, such as water-reducers and high-range water-reducing agents, are commonly used to facilitate fiber addition while keeping the water-cement ratio to a minimum. Since premix composites generally have only 2 to 3 percent by weight of AR-glass, they are not as strong as sprayed-up GFRC. Premix GFRC is generally used to produce small complex shaped components and specialty cladding panels.

3.3—Properties of GFRC

Mechanical properties of GFRC composites depend upon fiber content, polymer content (if used), water-cement ratio, porosity, sand content, fiber orientation, fiber length, and curing [3.7]. The primary properties of spray-up GFRC used for design are the 28-day flexural Proportional Elastic Limit (PEL) and the 28-day flexural Modulus of Rupture (MOR) [3.8]. The PEL stress is a measure of the matrix cracking stress. The 28-day PEL is used in design as the limiting stress to ensure that long-term, in-service panel stresses are maintained below the composite cracking strength. In addition, demolding and other handling stresses should remain below the PEL of the material at the specific time that the event takes place [3.8].

A generalized load-deflection curve for a 28-day old GFRC composite subjected to a flexure test is shown in Fig. 3.1. As indicated by this generalized load-deflection curve, young (28-day old) GFRC composites typically possess considerable load and strain capacity beyond the matrix cracking strength (PEL). The mechanism that is primarily responsible for this additional strength and ductility is fiber pull-out. Upon first cracking, much of the deformation is attributed to fiber extension. As load and deformation continue to increase, and multiple cracking occurs beyond the proportional elastic limit, fibers begin to debond and subsequently slip or pull-out to span the cracks and resist the applied load. Load resistance is developed through friction between the glass fibers and the cement matrix as the fibers debond and pull-out [3.10, 3.11].

Typical 28-day material property values for spray-up AR-GFRC are presented in Table 3.3 [3.8]. Flexural strength is

Table 3.3— Typical 28-day material property values for AR-GFRC

Property	AR-GFRC System*
Flexural strength, psi Modulus of Rupture (MOR) Proportional Elastic Limit (PEL)	 2500-4000 900-1500
Tensile strength, psi Ultimate Tensile Strength (UTS) Bend Over Point (BOP)	 1000-1600 700-1000
Shear strength, psi Interlaminar In-plane	 400-800 1000-1600
Impact strength, in. lb/in.^{2} Charpy	 55-140
Dry density, lb/ft^3	120-140

*Sprayed (non-dewatered) with 5 percent by weight of AR-fiber, sand: cement ratios range from 1:3 to 1:1, and water-cement ratios range from 0.25 to 0.35.

Metric equivalents: 1 psi = 6.895 kPa; 1 in.-lb/in.^{2} = 0.175 N-mm/mm^2; 1 lb/ft^3 = 16.019 kg/m^3

determined according to ASTM C 947 and density is determined according to ASTM C 948.

GFRC made of cement, AR-glass fibers, sand, and water is a non-combustible material and meets the criteria of ASTM E 136. When used as a surface material, its flame spread index is zero [3.8]. GFRC made with an acrylic thermoplastic copolymer dispersion for curing purposes will not pass ASTM E 136, but will have a flame spread index of less than 25.

Single skin GFRC panels can be designed to provide resistance to the passage of flame, but fire endurances of greater than 15 minutes, as defined in ASTM E 119, are primarily dependent upon the insulation and fire endurance characteristics of the drywall or back-up core [3.12].

3.4—Long-term performance of GFRC

Extended exposure of GFRC to natural weather environments will result in changes in mechanical properties. Furthermore, exposure of GFRC to normal natural weathering cycles (moisture and temperature cycles) will result in cyclical volumetric dimension changes. Changes in mechanical properties and cyclical dimensional movements must be accounted for by use of proper design procedures, such as those outlined in Sections 3.7 and 3.9.4 and detailed in References 3.5, 3.8, 3.13, and 3.14.

Most commercially manufactured GFRC composites will experience reduction in tensile and flexural strengths and ductility with age if exposed to an outdoor environment. The strength of fully-aged GFRC composites will decrease to about 40 percent of the initial strength prior to aging. However, strain capacity (ductility or toughness) will decrease to about 20 percent of the initial strain capacity prior to aging. This loss in strain capacity is often referred to as composite embrittlement. Embrittlement is time and environment dependent and is accounted for in design of GFRC components as is explained in Section 2.6.

Dimensional changes in GFRC can be considerably greater than those of conventional concrete. This is the result of the high cement content in the mortar matrix. Cyclic strains resulting from wetting and drying can be as large as 0.15 percent, and strains of this magnitude are generally encountered throughout the service life of the facade panel [3.14]. Given sufficient exposure, this dimensional sensitivity can lead to over stressing unless accommodated for in design. Over stressing or stress concentrations can cause cracks to develop. This can be critical in components that are overly restrained. In addition, as the composite ages and becomes less ductile, the most effective and practical way to accommodate dimension change is to eliminate restraint by using flexible connections as described in Section 3.9 [3.5, 3.8, 3.13, 3.14]. Experience with single skin, steel-stud/flex-anchor connection type panels has shown them to be less sensitive to long-term cracking associated with restraint of panel movements caused by normal changes in moisture and temperature [3.15]. In the future, the application of surface coatings to reduce or eliminate moisture movement and thereby reduce shrinkage strains may turn out to be a valuable tool to deal with this phenomena. In addition, surface coatings may reduce the extent of embrittlement which usually takes place in moist conditions.

The durability performance of the composite material itself is usually evaluated by determining the changes in strength and toughness during exposure to natural weather or under accelerated aging conditions (immersion in hot water baths). Two basic theories have been suggested to explain loss in strength and strain capacity in GFRC composites. One theory is that alkali attack on the glass fiber surfaces results in the reduction of the fiber tensile strength and, subsequently, reduction of composite strength [3.16]. The second and most accepted theory suggests that ongoing cement hydration in water-stored or naturally weathered GFRC results in hydration products penetrating the fiber bundles, filling the interstitial spaces between glass filaments, thereby increasing the bond to individual glass filaments. This phenomenon can lead to lack of fiber pull-out and results in a loss in tensile strength and ductility [3.10, 3.17, 3.18, 3.19]. It is possible that both phenomena (alkali attack and filling of the interstitial spaces between glass filaments) are occurring simultaneously and at different rates, with alkali attack being more significant in E-glass fiber systems and the mechanism of filling interstitial space between fibers being the main cause of strength and ductility loss in AR-glass fiber systems [3.19, 3.20].

3.4.1—*Strength and toughness retention of AR-GFRC*

Following the introduction of Cem-FIL AR-glass fiber in 1971, test programs were independently initiated by BRE, Pilkington Brothers Ltd., and Owens-Corning Fiberglas to assess long-term strength and toughness behavior of AR-glass composites when exposed to a range of environmental conditions. Data for l0-year-old long-term strength durability tests have been published [3.16, 3.21] for composites having no sand and no polymer (neat cement composites). These data are presented in Figs. 3.2 through 3.4. As shown in Fig. 3.2, Modulus of Rupture (MOR) decreased with time under natural weathering conditions. After 10 years of natural weathering in

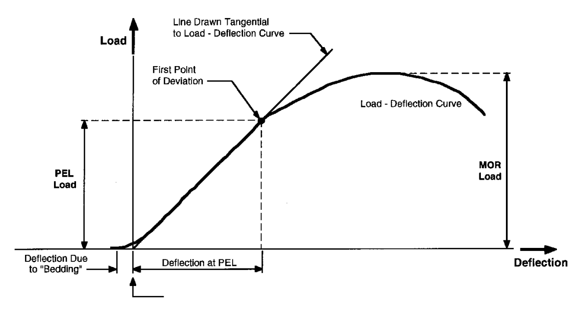


Fig. 3.1—Generalized load-deflection curve for 28-day-old GFRC subjected to a flexural test

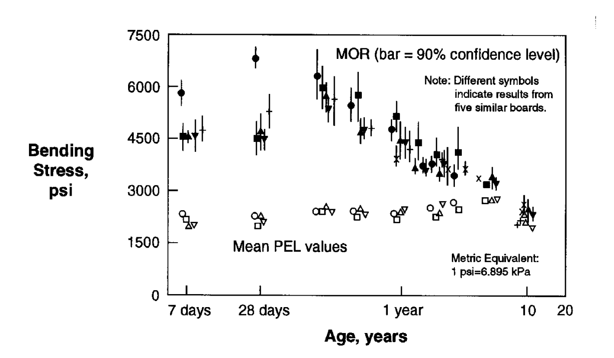


Fig. 3.2—Modulus of rupture and proportional elastic limit versus age for neat cement AF-GFRC composites stored in natural U.K. weathering conditions

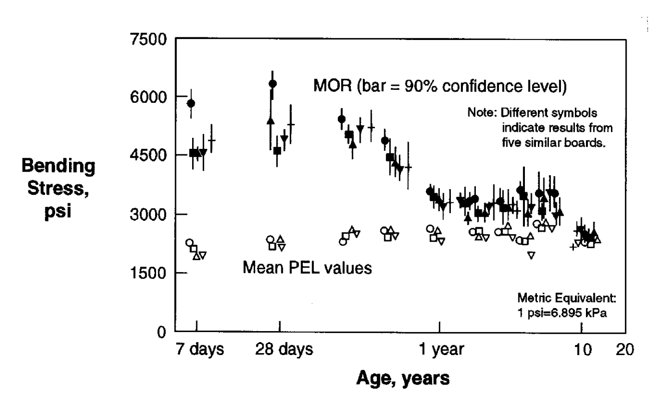


Fig. 3.3—Modulus of rupture and proportional elastic limit versus age for neat cement AR-GFRC composites stored in water at 64 to 68 F (20 C)

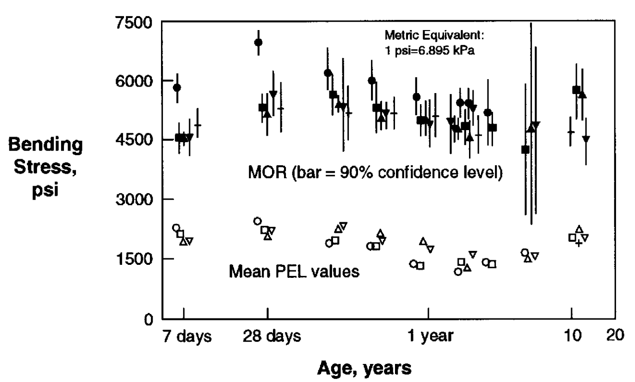


Fig. 3.4—Modulus of rupture and proportional elastic limit versus age for neat cement AF-GFRC composites stored in air at 68 F (20 C) and 40 percent relative humidity

the United Kingdom, the MOR decreased to nearly the strength level of the Proportional Elastic Limit (PEL). In addition, data shown in Fig. 3.3 indicate that AR-GFRC composites stored in water at 64 to 68 F (18 to 20 C) exhibited this same MOR strength loss over the same period of time. However, composites stored at 68 F (20 C) and 40 percent relative humidity exhibited relatively little MOR strength loss with age as shown in Fig. 3.4 [3.21].

In addition to the long-term natural aging test programs, accelerated aging programs were conducted by all three major glass fiber producers so that projections of aged properties could be made in advance of the natural aging data. Accelerated aging is accomplished by immersing composites in water at elevated temperature to expedite the cement hydration process [3.22, 3.23]. However, true aging of a specific GFRC product can only be accomplished through actual use of the product under normal in-place environmental conditions. Any attempt to characterize the aged behavior of GFRC using accelerated methods is only an approximation.

For GFRC panels (containing no polymer and made with either neat cement or sand-to-cement ratios of 1-to-3), accelerated aging data have been correlated with data obtained from natural weathering conditions for the purpose of projecting long-term durability. In an investigation conducted by Pilkington Brothers Ltd., this correlation was accomplished for different climates throughout the world. Based on this investigation, it is projected that for many exposure conditions, the MOR of GFRC composites will eventually decrease to nearly the strength level of the PEL. For many GFRC products exposed to outdoor environments, this strength reduction is shown to occur within their normal life spans and may be a function of panel surface treatment (exposed aggregate and surface sealers) and environment. However, neither panel loading histories nor the effects of possible panel surface treatments were considered in the investigation.

In addition, strength reduction has been shown to occur at faster rates in warmer, more humid climates [3.22, 3.24]. Figure 3.5 presents modulus of rupture data for composites exposed to natural weathering in the United Kingdom and for composites having undergone accelerated aging at elevated temperatures [3.22]. Data indicate that as the accelerated aging temperature increases, a faster drop in MOR strength is observed. A lower limit exists for the MOR strength that is essentially equal to the PEL of the composite, which is a measure of the matrix cracking strength of the reinforced composite.

Use of accelerated aging procedures has led to strength predictions extending over many years. Modulus of Rupture strengths shown in Fig. 3.5 for composites aged at 122, 140, and 176 F (50, 60, and 80 C) have been combined with the actual U.K. weathering results out to 10 years in Fig. 3.6 [3.25]. This has been accomplished by displacing the higher temperature accelerated strength results along the log-time axis until they coincide with the strength results of composites stored in the U.K. weathering conditions. As shown in

Fig. 3.6, results for the different acceleration temperatures form a common curve that extends forward for many years.

Loss in strain capacity is also observed upon aging of GFRC composites. Shown in Fig. 3.7 are representative stress-strain curves in tension and bending for composites tested at 28 days and 5 years. All composites were stored in water at approximately 68 F (20 C) [3.26, 3.27]. Unaged composites, tested at 28 days, exhibit strain capacities on the order of 1 percent for both tension and bending tests as shown in Fig. 3.7a. Composites aged for five years in water at 68 F (20 C) show a substantial decrease in strain capacity as indicated in Fig. 3.7b. Loss in strain capacity with aging, which is much greater than reduction in tensile or flexural strength, may be of greater significance to the long-term performance since it leads to an increased sensitivity to cracking. This characteristic of the material can be estimated by impact resistance testing. For an in-depth discussion of toughness durability, see Ref. 3.28.

It has been reported [3.29, 3.30]that additions of polymers to AR-GFRC provide valuable advantages, such as reducing absorption and reducing wet/dry shrinkage movements. However, the AR-GFRC composites with polymer additions did not correlate well with predictions of long-term strength from hot water accelerated aging tests versus performance in real weathering exposure.

In hot water aging, polymer additions have been shown to provide no significant advantage in strength retention. However, there have been reports of improvements in strength retention during actual weathering exposure over several years [3.29]. It has been reported that after 2 years in the hot Florida and Arizona climates, AR-GFRC with 5 percent polymer solids by volume of total mix and 5 percent by weight of total mix of a specially coated AR-glass (to be discussed in Section 3.4.3.1) showed no loss in MOR strength and retention of high strain to failure [3.29]. With regard to comparisons of strength durability between accelerated aging and real weathering, one researcher reports that polymer additions do not inhibit embrittlement of the fiber system in total water immersion and hence do not lead to strength retention [3.11]. However, in natural weathering conditions, the water absorption is reduced, thereby postponing the time effects of fiber embrittlement [3.29, 3.31]. The study has also shown that under natural weathering conditions, a minimum addition of 5 percent polymer solids by volume of total mix to GFRC provides improved strength retention over standard GFRC [3.29, 3.32].

Due to the difference in measured performance between GFRC with and without polymer additions using the standard hot water immersion accelerated aging test, a test procedure adapted from the European asbestos-cement industry has been substituted [3.33]. The alternate accelerated aging test involves immersion in water at 68 F (20 C) for 24 hours followed by forced air drying at 158 F (70 C) at a speed of 3.3 fps (1 m/sec) for 24 hours. This is considered one cycle. The test typically involves at least 160 exposure cycles. Better correlation between accelerated aging results of this test and natural weathering have been observed for composites containing polymer [3.31, 3.33].

The results show that for a polymer content of 5 percent by volume of mix, modest improvements in MOR, PEL, and strain at MOR have been obtained. MOR after 160 wet/dry cycles was

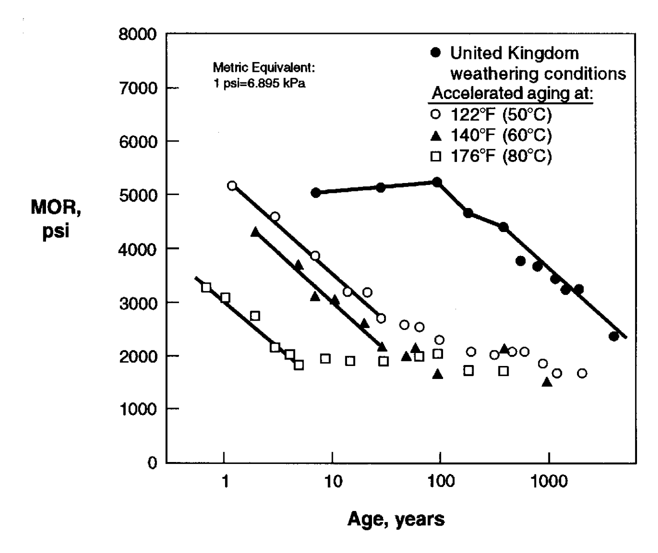


Fig. 3.5—Projected MOR versus age for neat cement AR-GFRC composites stored in natural U.K. weathering conditions and accelerated aging conditions

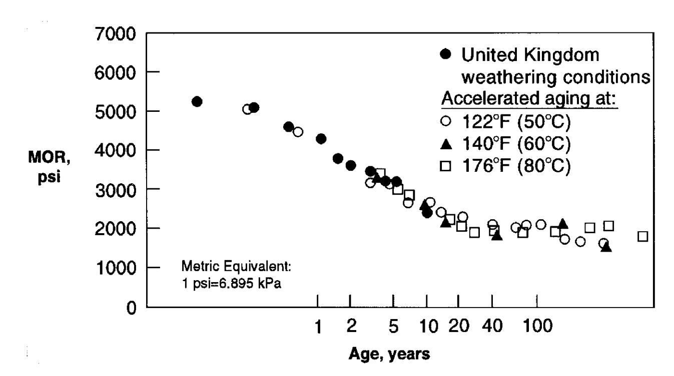


Fig. 3.6—Accelerated aging data used to project long-term strength of AR-GFRC under natural U.K. weathering conditions

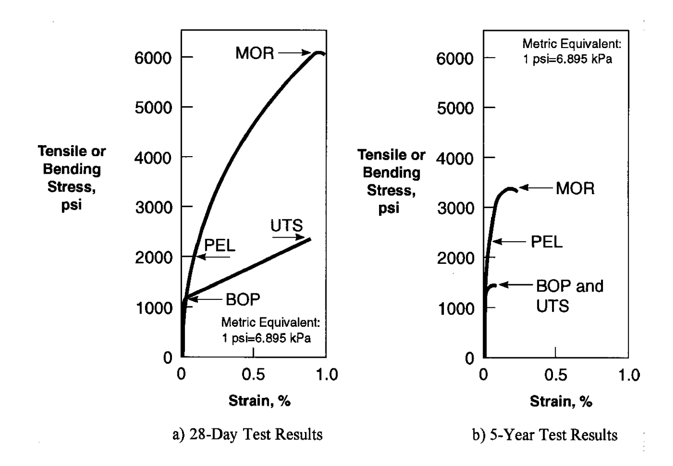


Fig. 3.7—Representative stress-strain curves in tension and bending for 1 AR-GFRC stored in water at 68 F (20 C)

approximately 2175 psi (15 MPa) compared to 1450 psi (10 MPa) for unmodified AR-GFRC. Values for initial MOR (before wet/dry cycling) was approximately 3915 psi (27 MPa) with 5 percent polymer content by volume of mix compared to

4205 psi (29 MPa) without polymer. Strain at the MOR was approximately 0.25 percent compared to 0.1 percent for unmodified AR-GFRC. Polymer contents of 9 and 12.5 percent by volume of mix showed more substantial retention of MOR strength and strain. After 160 wet/dry cycles, MOR remained at approximately 3300 and 4000 psi (23 and 28 MPa), respectively. Strain at the MOR was approximately 0.8 and 1.0 percent, respectively [3.33].

3.4.2—*Polymer (modified) E-glass fiber reinforced concrete (P-GFRC)*

In 1979, a different type of glass fiber reinforced concrete was introduced in Europe [3.34, 3.35]. It consisted of E-glass fibers embedded in a matrix that was made up of cement, sand, and a minimum of 10 percent polymer by volume of mix. At the present time, there is little use of this system in the United States. The majority of its use has been in the European countries. The reason for incorporating a polymer into the cement matrix-glass fiber system is to provide improved long-term durability. The concept behind achieving long-term strength durability through polymer modification of GFRC is described below [3.35, 3.36].

There are generally 204 individual glass filaments within a glass fiber bundle. The diameter of a single filament is approximately 10 microns. The width of spaces between glass filaments is only two to three microns. The average diameter of an anhydrous cement particle is approximately 30 microns. Therefore, most cement particles cannot pass into the spaces between the glass filaments within a typical glass fiber bundle. However, formation of hydration products, specifically calcium hydroxide [$Ca(OH)_2$], can occur inside these spaces and is thought by some to be the major cause of embrittlement and the decrease in composite strength with time.

In an attempt to reduce both physical embrittlement and chemical attack of the glass fibers, polymer particles were introduced into a system of E-glass fibers, cement, sand, and water. These polymer particles are only a fraction of a micron in diameter. Therefore, they can penetrate into the spaces between the glass filaments. Upon combining glass and a mortar containing a polymer dispersion, glass bundles take up water due to capillary forces acting in the spaces. The water carries the polymer particles into these spaces. The polymer particles adhere to each other as water is removed through both evaporation and hydration of the cement. The result is a polymer film that spreads in and around the individual glass filaments within each glass bundle [3.35-3.38].

The polymer film reportedly performs two functions. It protects some of the individual glass filaments from alkali attack and it partially fills the spaces between filaments thereby reducing the effects of fiber embrittlement [3.36-3.38]. However, there are reports that polymer modification as high as 15 percent solids by volume only provides about 50 percent coverage of the E-glass filament surfaces and that those filaments not protected by the polymer film become severely etched by alkali attack after 17 weeks of accelerated aging at 122 F (50 C) [3.11].

3.4.3—*Recent developments for improvement of GFRC durability*

Even though polymer additions to AR-GFRC have been shown to reduce the rate at which GFRC composites lose strength and ductility [3.29, 3.33, 3.39-3.41], commercially available GFRC systems will still experience reductions in strength and ductility at a rate that is environment dependent. Over the past few years, several new methods of improving the long-term durability of GFRC have been developed. All of these methods involve either specially formulated chemical coatings on the glass fibers or modification of the cement matrix.

3.4.3.1 *Glass fiber modifications*—Since the introduction of alkali-resistant glass fiber in 1971, several attempts have been made to further improve glass fibers for use in GFRC. Most of these attempts have been directed towards improving commercially available AR-glass fibers by application of special fiber coatings. These special coatings are intended to reduce the affinity of the glass fibers for calcium hydroxide, the hydration product that is primarily responsible for composite embrittlement. Some second generation AR glass fibers, which are currently commercially available, are examples of the potential benefits of fiber coatings. Long-term durability data for composites manufactured with these fibers indicate that strength and ductility decrease at slower rates than conventional AR-glass composites. However, there is still some loss in strength and toughness indicated by current test results. Since predictions of long-term material properties are based on a correlation of accelerated aging data with natural aging data, it is still too early to make an accurate prediction of how effective these fibers will ultimately be for improving the long-term strength and ductility [3.25].

Nippon Electric Glass Company, Ltd., [3.42] has found that certain alkali resistant organic materials used as coatings for conventional AR-glass fiber will result in noticeable improvements in fiber tensile strength retention. Figure 3.8 illustrates the improved strength durability of conventional AR-glass fiber strand when alkali-resistant organic coatings are used. As indicated in Fig. 3.9, flexural strength tests performed on aged GFRC composites containing coated AR-glass fibers confirmed that the improved fiber strength retention does result in some improvement in the flexural strength retention of the GFRC composite [3.42].

A method called "silica fume slurry infiltration" was developed [3.43]to incorporate silica fume directly into the spaces between individual glass filaments in a fiber glass roving. It was discovered that by hand-dipping the rovings into a commercially dispersed silica fume slurry, the spaces between the individual glass filaments could be adequately filled with silica fume. Results of tests performed on aged composites containing 3 percent AR-glass fiber by weight and fabricated using silica fume slurry infiltration indicated a substantial decrease in the rate at which strength loss takes place [3.43]. It has not been determined whether this manufacturing method is commercially feasible.

Nippon Electric Glass Research laboratories have produced sprayed-up composites having 5 percent AR-glass and concentrations of silica fume up to 30 percent by weight of cement without significantly improving the aged strain capacity of the composite [3.42].

3.4.3.2 *Cement matrix modifications*—Over the years, several researchers have approached the GFRC strength durability problem by altering the cement matrix. Most of these efforts

were geared towards trying to reduce or eliminate the formation of calcium hydroxide produced during hydration.

Development of high alumina cement (HAC) and supersulphated cement represented early attempts at trying to modify the cement matrix. Although both of these cements were somewhat effective in improving the long-term strength durability of GFRC composites, other undesirable effects such as increased porosity and strength loss of the cement matrix were evident [3.44].

A more recent development is the use of lime reactive materials as cement additives. Silica fume and metakaolin as used in standard portland cement have proved to be effective agents for early reaction and elimination of calcium hydroxide. However, in order to significantly reduce the levels of calcium hydroxide, very large percentages (greater than 20 percent) of the materials must be used [3.42].

Methods have been developed to incorporate large percentages of silica into the cement matrix without dispersion problems [3.42, 3.43]. However, incorporation of large percentages of silica fume has not shown to be a very cost effective method of improving the long-term durability or aged strain capacity of GFRC.

Recently completed research [3.45] has resulted in the commercialization of a system, developed by Vetrotex, a subsidiary of St. Gobain, utilizing the addition of selected metakaolinites and an acrylic polymer to the GFRC mix. This system, which uses conventional production techniques, has shown to develop significantly higher aged properties than obtained using a conventional AR-GFRC mix [3.46].

Another new development regarding improved long-term strength durability of GFRC is CGC cement [3.42]. CGC cement was developed in Japan by Chichibu Cement Company in cooperation with Nippon Electric Glass Company, Ltd. This cement is claimed to produce no calcium hydroxide during hydration. As indicated in Fig. 3.10, tests performed on GFRC composites fabricated using CGC cement and AR-glass fibers indicated that initial 28-day strengths and ultimate strains (not shown in Fig. 3.10) are essentially retained after exposure to accelerated aging conditions. However, use of CGC cement in composites fabricated using E-glass fibers was unsuccessful because of the alkali attack on the glass fibers [3.42]

Primary curing after manufacture of sprayed or cast CGC cement is very important. Primary curing must be done according to the time-temperature curing regime shown in Fig. 3.11. Temperature must be automatically controlled using temperature sensors at the heat sources (usually steam). In the winter months, precuring is an effective way of saving time within the curing regime up to the final trowel finishing. The heating rate for primary curing must be maintained as noted to achieve optimum properties. The secondary curing after steam curing should be done indoors or in a protected area. In the case of products stored outside, items should be covered with a plastic sheet during the 7 days after demolding to prevent adverse drying from direct sunlight and wind.

Another promising candidate is a new cement introduced by Blue Circle Cement Company of England [3.47]. This cement, when combined with an additive developed by Molloy and Associates of Hutchins, Texas, is similar to CGC in terms of aged performance, and is available as a concentrate for addition to portland cement composites. Data indicate improved aged

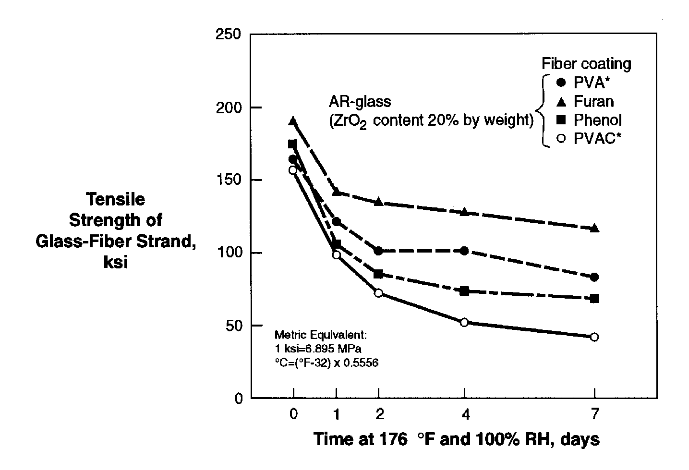


Fig. 3.8—Tensile strength of glass fiber strand with various coatings stored in OPC paste at 176 F (80 C)

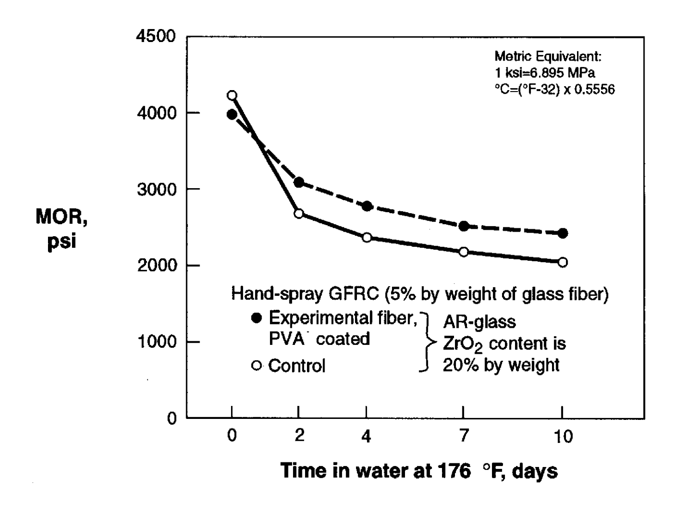


Fig. 3.9—Flexural strength of GFRC composites incorporating AR-glass fiber with alkali-resistant organic coating stored in water at 176 F (80 C)

strain capacity and unlike CGC cement, this material does not require a specific temperature controlled curing environment [3.48]. This cement is in commercial use in England. Research on the Blue Circle cement and other similar cements is currently underway in the United States [3.49]. These new cements are based on calcium sulphoaluminate and do not contain the cement phases that cause the conversion problems associated with high alumina cement. Tests are continuing to identify any other possible secondary reactions.

3.5—Freeze-thaw durability

Freeze-thaw durability of both AR-GFRC and P-GFRC composites has been studied [3.11, 3.36, 3.46]. Research has indicated that AR-glass fibers effectively preserve the cement matrix against significant freeze-thaw deterioration in comparison with an unreinforced matrix. There are some indications of a slight decrease in PEL strength due to the effects of freeze-thaw cycling [3.11].

Another study concluded that the freeze-thaw resistance of P-GFRC composites is good due to the lower absorption and greater ductility of the polymer modified matrix [3.36].

3.6—Design procedures

In the United States to date, design procedures have only been developed for AR-GFRC wall panels [3.8]. Design stress levels are based on a projection of the long-term properties. The long-term flexural strength of AR-GFRC exposed to natural weathering environments decreases with time to nearly, but not less than, the strength level of the unaged Proportional Elastic Limit (PEL). Furthermore, the PEL strength of AR-GFRC composites increases slightly with age. Therefore, design is conservatively based on the assumption that the long-term Modulus of Rupture (aged MOR) is equal to the 28-day PEL [3.8].

When designing GFRC panels, service loads are set by the designing, governing building code and are multiplied by the appropriate load factor from ACI 318 to determine factored loads. The following load factors and load combinations should be considered as a minimum [3.8]:

$$0.75\,[\,1.4\,D + 1.7\,(\text{greater of } L, W \text{ or } 1.1\,E) + 1.6\,(\text{greater of } M \text{ or } T)\,]$$

where:

D = Dead load
E = Earthquake load
L = Live load
M = Self-straining forces and effects arising from contraction or expansion due to moisture changes
T = Self-straining forces and effects arising from contraction or expansion due to temperature changes
W = Wind load

3.6.1—*Design stresses*

3.6.1.1 *Flexural*—Based on straight line theory of stress and strain in flexure, stresses due to factored loads should not exceed f_u:

$$f_u = \varphi s f'_u$$

Where:

φ = strength reduction factor
s = shape factor
f'_u = assumed (aged) modulus of rupture or ultimate flexural strength

The strength reduction factor (φ) is taken as 0.67. Derivation of this factor has been based on experience and judgment and is not intended to be precise. The shape factor (s) is a reduction factor to account for stress redistributions that occur in special cross sections. The basic strength test for GFRC in flexure uses a solid rectangular specimen. The shape factor for this cross section, which is also used for design of single skin panels, is 1.0. Shape factor suggested for flanged, box, or I sections is 0.5. Other values may be used if substantiated by test.

The assumed (aged) modulus of rupture (f_u) for design purposes is given by the lesser of the following:

$$\frac{f_{yr}(1 - tV_y)}{0.9} \text{ or } \frac{1/3\, f_{ur}(1 - tV_u)}{0.9} \text{ or } 1200 \text{ psi (8MPa)}$$

where:

f_{yr} = average 28-day PEL strength of 20 consecutive tests (each test being the average of six individual test coupons).
f_{ur} = average 28-day MOR strength of 20 consecutive tests (each test being the average of six individual test coupons).
t = “Students t,” a statistical constant to allow for the proportion of tests that may fall below f_u. The value is 2.539 for the recommended 20 tests.
V_y, V_u = coefficient of variation of the PEL and MOR test strengths, respectively.

The average 28-day PEL and MOR strengths are determined according to ASTM C 947.

3.6.1.2 *Shear*—Reference 3.8 states that direct shear seldom controls the design of GFRC elements. Interlaminar shear seldom controls design unless the shear span-to-depth ratio is less than 16. In-plane shear, occurring in diaphragms and webs, seldom controls design. However, in-plane shear should be checked based on principal tensile stresses that are limited by the allowable tensile stress. The allowable tensile stress is assumed to be equal to 0.4 $\varphi f'_u$.

3.6.1.3 *Deflection*—Deflections due to service loads are generally limited to $^1/_{240}$ of the span. This limit can be exceeded when investigation shows that adjacent construction is not likely to be damaged by deflection.

3.6.2—*Connections*

There are several methods being used to fasten GFRC panels to buildings. The fastening detail must provide for and accommodate creep, thermal and moisture induced panel movement, field tolerances, and dimensional changes in the structural frame of the building.

Each manufacturer is required to test production connections to establish test data for use in design. Test values are reduced by the appropriate safety factors to determine connection strength for use in design.

3.7—Applications of GFRC

By far, the single largest application of GFRC has been the manufacture of exterior building facade panels. This application makes up at least 80 percent of all GFRC architectural and structural components manufactured in the U.S. Since the introduction of AR-glass in the 1970s, growth in applications has been appreciable. According to the Precast/Prestressed Concrete Institute, over 60 million square feet of GFRC architectural cladding panels have been erected from 1977 to 1993. Initial problems in controlling panel warpage were solved using steel-stud frames, which also facilitated efficient attachment to building structures.

Another large application of GFRC is surface bonding, which is discussed in Section 3.10. Use of GFRC in other applications, such as electrical utility products—e.g., trench systems and distribution boxes—continue to increase as does surface bonding and floating dock applications. A growing application for GFRC is building restoration, replacing existing walls and ornate tile facades capitalizing on the light weight and shape versatility of the composite. Other application areas in which GFRC components are either already commercially produced, under development, or show future potential are listed in Table 3.4 [3.50, 3.51].

3.8—GFRC panel manufacture

Good GFRC manufacturing requires that manufacturers have the required physical plant and equipment, trained personnel, as

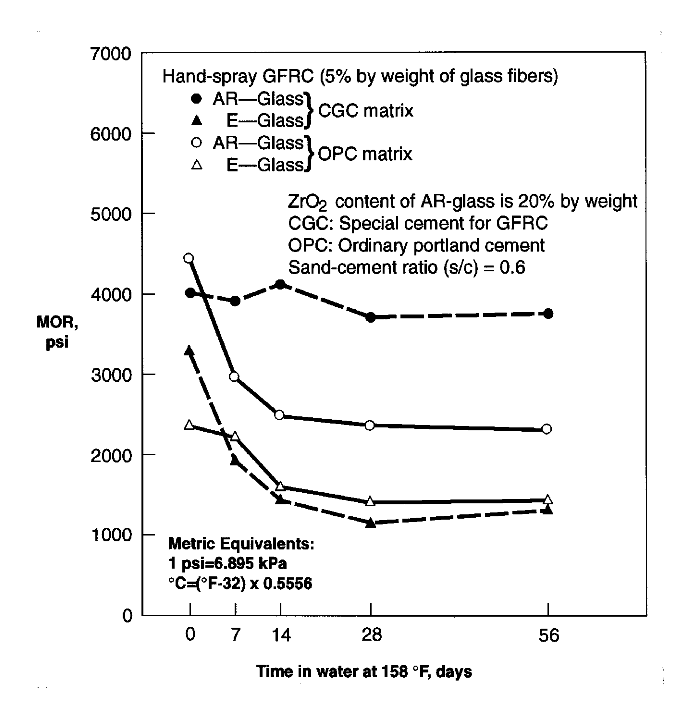


Fig. 3.10—Relative flexural strength of CGC-matrix GFRC composites stored in water at 158 F (70 C)

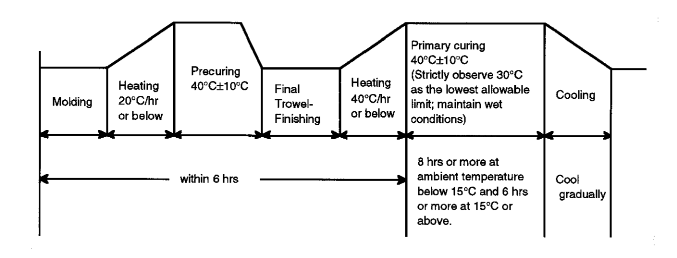


Fig. 3.11—Required curing regime for AR-GFRC composites manufactured with CGC cement

well as in-house quality control procedures to ensure a consistency in quality from panel to panel and project to project [3.7].

It is not the objective of this document to describe specific items relating to plant size or equipment type. However, the GFRC plant should be clean, have an enclosed area for the spraying or casting operation, the ability to maintain temperatures for adequate curing, well-maintained equipment for the proper proportioning and mixing of the materials, as well as equipment to deposit the materials in the forms. Furthermore, a GFRC plant should have a comprehensive quality control (QC) program for monitoring composite materials, in-process manufacturing operations, finished product, as well as a comprehensive testing program to determine production composite properties and a system for maintaining QC records [3.7, 3.52, 3.53].

Since the introduction of GFRC panels in the early l970s, three basic panel types have been manufactured: (1) sandwich panel, (2) integral rib panel, and (3) steel-stud/flex-anchor panel. Since the early l980's, the industry has evolved such that the majority of facade panels being manufactured in the U.S. is the steel-stud/flex-anchor panel. Therefore, this section on panel manufacture is exclusively devoted to the steel-stud/flex-anchor type of panel construction. There are a few producers that manufacture a sandwich panel using GFRC premix construction.

3.8.1—*Steel-stud framing system [3.7, 3.8]*

The steel-stud frame should be fabricated in accordance with Metal Lath/Steel Framing Association's "Lightweight Steel Framing Systems Manual." The studs are generally placed at 16 to 24 in. (0.4 to 0.6 m) on center with the flex-anchors (discussed in Section 3.8.2) spaced 16 to 36 in. (0.4 to 0.9 m) on center, based on design considerations. The prefabricated stud frame will be moved several times both before and after skin attachment; therefore, welded rather than screw connections are more desirable, although both systems are acceptable. With welding, studs are usually a minimum of 16 gauge material. Touch-up paint or coatings should be applied to accessible welds of the light gauge material after the stud frame has been fabricated. A photograph of a steel-stud frame being manufactured is shown in Fig. 3.12.

Environmental conditions will usually determine to what extent steel framing needs corrosion protection. Steel-studs are available with a red oxide paint or galvanized finish (before slitting and forming). Flex-anchor and gravity anchors may be zinc or cadmium plated before or after fabrication, painted with a zinc-rich coating, or they may be stainless steel, where the additional cost is justified by severe environmental conditions.

After fabrication, the stud frame is ready to be attached to the GFRC skin after the skin is sprayed and roller compacted to its design thickness. The stud frame is positioned over the skin with jigs to fix its location. Flex-anchors sometimes telegraph through and show on the face of the panel, so for production convenience they are usually set from $^1/_8$ to $^3/_8$ in. (3 to 10 mm) away from the surface of the GFRC skin. With some finishes, they may touch the surface of the GFRC skin. Where the flex-anchor is attached to the GFRC skin, the bonding pad is manufactured in one of two ways. They are the "green sheet overlay process" and the "hand-pack method." Both methods require the operators to hand apply the bonding pads and knead them into the GFRC skin. Time delay between the final roller compaction of the GFRC skin and the placement of the frame and the bonding pads should be kept to a minimum. This is necessary to ensure monolithic bonding of the bonding pads. If there is a significant time delay, initial set of the skin could prevent the bonding pad from achieving monolithic bonding to the skin and there could be a potential for subsequent delamination [3.52, 3.53].

The bonding pad thickness over the top of the flex-anchor contact foot should be a minimum of $^1/_2$ in. (13 mm) with a bonding area of 18 to 32 in.^{2} (13 to 20 x 10^3 mm^2). Care must also be taken not to build up the bonding pad over the heel of the flex-anchor and thus add undue restraint to skin movement.

The bonding pad over the cross piece of the flat bar tee gravity anchor should be sized to adequately support the tributary weight of the GFRC skin. Sizing of bonding pads should be based on actual axial and shear pull-off tests of bonding pads in the fully aged condition. This is discussed further in Section 3.9.4.

Table 3.4— Applications of GFRC

General area	Specific examples
Agriculture	Livestock products -water troughs -feeding troughs -sheep dips -pig slurry channels Sheds Irrigation channels Reservoir linings
Architectural cladding	Interior panels -single skin -double skin (thermally insulated) -paint, tile, aggregate facings Exterior panels -single skin -double skin (thermally insulated) -profile -paint, tile, aggregate facings, single skin
Architectural component	Doors and door frames Windows, sub-frames, and sills Elements for suspended ceilings Raised access floor panels Interior fixtures -prefabricated bathroom units -lavatory units -bench tops -shelving Shells
Asbestos replacement	Simple sheet cladding -flat -profiled Promenade and plain roof tiles Fire resistant pads General molded shapes and forms Pipes
Ducts and shafts	Track-side ducting for cables and switchgear Internal service ducts
Fire protective systems	Fire doors Internal fire walls, partitions Calcium silicate insulation sheets
General building (excluding wall systems and cladding panels)	Roofing systems (tiles, shingles) Lintels Cellar grills and floor gratings Decorative grills and sun shades Hollow non-structural columns or pillars Impact resistant industrial floors Brick facade siding panels Cellular concrete slabs
Low-cost housing, schools, factory buildings	Single and double skin cladding onto timber frame construction Prefabricated floor and roof units
Marine applications	Hollow buoys Floating pontoons Marina walkways Workboats, dinghies
Metal placement	Sheet piling for canal, lake, or ocean revetments Covers -manholes -meters -gasoline storage tanks at service stations -grating covers for guttering Hoods Stair treads
Miscellaneous	Sun collector castings Artificial rocks for zoo or park settings

Table 3.4— Applications of GFRC, continued

General area	Specific examples
Pavements	Overlays (to control reflection cracking)
Permanent and temporary	Bridge decking formwork Parapets Abutments Waffle forms Columns and beams
Reparations	Repair of deteriorating sculptured architectural—cornice, frieze, architrave
Site-applied surface bonding	Bonding of dry-block walls Single skin surface bonding to metal lath substrates Ultra-low- cost shelters (stacked unmortared mud brick)
Small buildings and enclosures	Sheds Garages Acoustic enclosures Kiosks Telephone booths
Small containers	Telecommunication junction boxes Storage tanks, silos Stop-cock and meter encasements and covers Manhole encasements and covers Utility boxes
Street furniture and associated	Seats and benches components Planters Litter bins Signs Noise barriers Bus shelters Revetment facing panels
Water applications	Low pressure pipes -drainage -sewerage Sewer linings Water channels (culverts) Canal linings Field drainage components -inspection chambers -hydrant chambers -head wall liners -pipe drain inlets -drainage covers, traps -guttering Tanks -swimming pools, ponds -fish farming -sewage treatment -septic tanks -storage tanks





Fig. 3.12—Fabrication of steel-stud frame

3.8.2—*Flex-anchor connections [3.7, 3.8, 3.49]*

In one connection method, the GFRC skin is attached to the steel-stud frame using flex-anchor connections. The weight of the GFRC skin is transferred to the steel-studs by the bending strength of the flex-anchors. To ensure structural integrity, the anchors must be of ample rigidity and strength to carry their tributary gravity and wind loads while still remaining flexible enough to allow relatively unrestrained thermal or moisture movements of the skin. This method is recommended for panels small enough that flex-anchor restraint stresses are acceptable.

If the flex-anchors are too rigid, they can induce high tensile stresses in the GFRC skin. Substantial GFRC skin movements caused by normal temperature and moisture effects, both uniform and gradient (through the skin thickness), can occur. In most circumstances, they result in the flex-anchors being stressed to their yield level. Flex-anchor stresses in excess of the actual yield stress may cause excessive deflections and, subsequently, material fatigue problems. For design simplicity, it is suggested that all flex-anchors be assumed to exert a restraining tensile stress in the GFRC skin equivalent to that which develops when their yield strength is reached.

This simplified approach is proposed in recognition of the difficulty in quantifying all factors. Gravity anchors then are required, and they should be flexible in the horizontal direction.

Figure 3.13 shows the most common type of flex-anchor. Although it is used with many variations, it is usually made with a smooth, round rod not less than $^1/_4$ in. (6 mm) in diameter. (Diameter choice is influenced by the clear length of flex anchor from weld to bonding pad and by whether or not a separate gravity anchor is provided.) It is welded at the top for flexibility with groove welds, although a square bar may be used for fillet welding convenience.

A plastic sleeve may be put over the anchor foot to minimize restraint. Anchor orientation with the toes positioned toward the center of the panel is advisable so that initial drying shrinkage will tend to move the flex-anchor away from rather than toward the stud. Also, rigid fire protection or thermal insulations should be installed so as not to inhibit skin movement.

Unsupported edges of GFRC panels can bow or warp due to moisture or temperature effects. This can present a problem with panel alignment, as well as an unsightly joint. It is, therefore, recommended that the edge distance to the end steel-stud be kept small to minimize warpage.

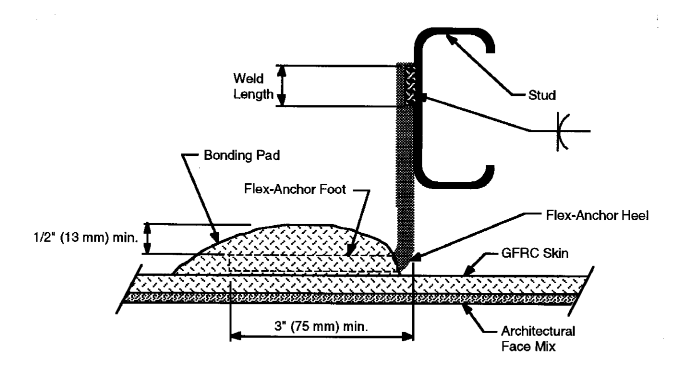
3.8.3—*Gravity anchor connections [3.7, 3.8]*

In larger, heavier panels, if the GFRC skin is attached to the steel-stud frame with only flex-anchors, the flex-anchors may provide excessive restraint and over-stress the skin. If the dead load is carried separately by special gravity anchor connections, the flex-anchors can be made smaller ($^1/_4$ in. or 6 mm minimum diameter), thereby substantially reducing the in-plane restraint.

In its plane the skin is quite rigid. If the steel-stud frame is made rigid with diagonals or heavy upper and/or lower tracks or if the frame is uniformly supported by the structure, the gravity load of the skin can be carried with a series of gravity anchors. This is usually accomplished with the trussed round bar gravity anchors located on every typical steel-stud or every other typical steel-stud as shown in Fig. 3.14.

If the frame is supported at two points, it may be convenient to support the skin's dead weight at the two corresponding locations. This allows the in-plane rigidity of the stud frame to be lower since the skin weight is carried only by the panel connector studs or tubes directly to the building connections. The connector studs or tubes may need strengthening locally for full height. The remaining typical studs then act as floating stiffeners. This is usually accomplished with the flat plate tee gravity anchor shown in Fig. 3.15. By adjusting the plate height and thickness, vertical strength of the anchor is achieved without sacrificing horizontal flexibility.

In seismic areas, the longitudinal seismic force resistance requirements must be achieved without excessive restraint. When using flex-anchors alone or a flex-anchor/gravity anchor system, stiffness of the steel-stud along the weak axis



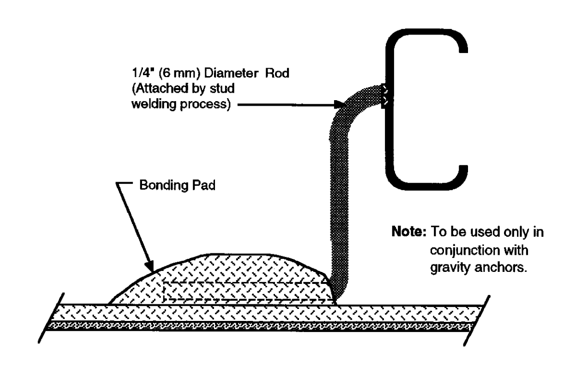


Fig. 3.13—Examples of flex-anchors

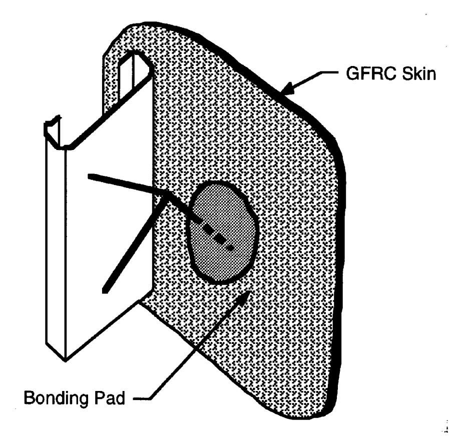


Fig. 3.14—Round-bar trussed gravity anchor

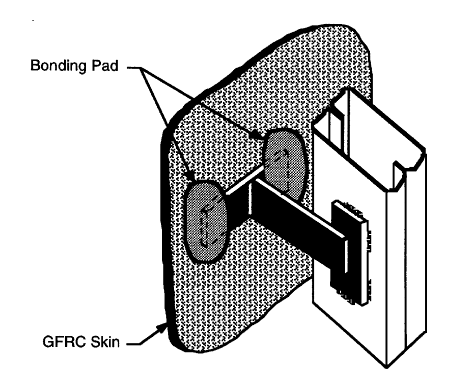


Fig. 3.15—Flat-plate tee gravity anchor

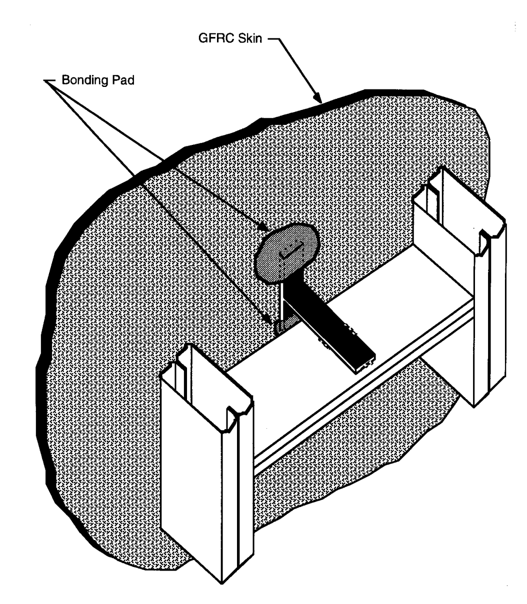


Fig. 3.16—Flat-plate tee longitudinal seismic anchor

must be considered. With a flat-plate tee system, it is advisable to strengthen only one (not both) of the gravity anchors to carry the seismic load. A horizontally oriented flat-plate tee anchor may be used to carry the longitudinal seismic force to the stud frame as shown in Fig. 3.16. There will be rotational forces that the anchor system must carry, if the seismic anchor system is not colinear with the center of mass of the skin.

Since the gravity anchors provide the fixed point from or toward which the GFRC skin moves, it may be advantageous to put the gravity anchors at mid-height for vertical panels. This also has seismic advantages in that overturning moments are reduced. However, permanent tensile stresses are produced, since the bottom half of the panel is hanging from the gravity anchors. Generally, it is preferable to have permanent stresses compressive, although they would have to be weighed against the seismic stresses. Stresses in both directions may also have to be considered at times [3.52, 3.53].

3.8.4—*Connection tests [3.89, 3.49]*

It is necessary that each producer perform a sufficient number of tests to develop a data base from which an allowable design load can be determined for each type of flex-anchor or gravity anchor. Seven test specimens made in an identical manner to the panel anchors should be tested. The highest and lowest values should be eliminated and the average of the five remaining values should be used for determining the allowable design load [3.8].

It is preferable to perform tests on representative, artificially aged specimens so that long-term material property variations are accounted for in design. Tests of artificially aged connections and bonding pads indicate strength reductions of 25 to 50 percent with the failure plane occurring typically at the bonding pad/panel interface or as a shear wedge above the flex-anchor foot [3.52, 3.53]. A conservative safety factor of 4 to service loads should be used on the aged test results. If the test specimens are unaged, a safety factor of 5 to service loads is

used on the test results. Test procedures that accurately simulate in-service conditions should be developed.

3.8.5—*Steel-stud frame/GFRC panel design approaches [3.8]*

Depending on the panel configuration and skin attachment system, the stud frames may need to provide in-plane rigidity comparable to the GFRC skin so that each stud can support its tributary portion of vertical loads. The frame must also have sufficient rigidity perpendicular to its plane to resist skin bowing forces caused by restraint of skin shrinkage. Bowing tendencies are generally greatest when the GFRC skin and the bonded face mix are not dimensionally compatible.

It has become apparent that some designers have not sufficiently recognized the effects of differential shrinkage and thermal expansion when panels are faced with a material that has different volume change properties than the GFRC [3.54]. If polymer addition is used in the GFRC, it should also be used in the face mix when possible, to ensure compatibility and to increase the aggregate-to-cement bond.

For integrally bonded facings, these effects can be minimized when the facing materials are selected to establish compatible material properties. When this is not possible, careful consideration of the induced stresses must be recognized in the design to ensure proper serviceability. For applied facings, the use of flexible adhesives or bond breakers and flexible anchors is recommended. In any case, properties used in analyses and design must be confirmed by each manufacturer through testing of the materials.

The GFRC skin should not be relied on to provide bracing for stud stability. Depending on stud dimensions, support conditions, interior finish, etc., bridging may be required to prevent stud buckling.

The steel-stud frame for a GFRC panel can be analyzed by many different methods. The GFRC skin spans between flex-anchors. It can be analyzed as (1) a simple beam between flex-anchors, (2) a continuous beam over a row of flex-anchors, or (3) a two-way slab system over an area of flex-anchors. In most cases, the edge GFRC skin is unsupported and needs to be checked by the designer.

The load from the GFRC skin is transmitted through the gravity and flex-anchors to the steel-studs. From the studs, the load is transmitted by horizontal tracks and vertical connector studs to the building connections and then to the structure. When the loads in the steel-stud frame exceed the capacity of the single stud, it is necessary to weld steel-studs together or to use a rolled structural steel shape.

Depending on the skin's gravity transfer system and its relationship to the panel bearing connectors, diagonal braces or strengthening of the horizontal tracks may be required. Also, greater stud capacity is required at the connection locations since they will resist the loads collected by the horizontal tracks. Increased capacity is usually accomplished by using double or boxed studs or by using a rolled structural shape.

Generally, the stud frame is attached to the structure with two load bearing connections (to eliminate indeterminate reactions) and additional non-load bearing (lateral) connections. At the connection of the steel-stud frame to the structure, it is common to supplement the light gauge steel-stud framing by welding heavier plate or angle assemblies to the studs in order to achieve better distribution of the load. However, in designs where welding is not practical or economical, rolled structural shapes can be used in lieu of steel-studs. Since the freedom from restraint of the GFRC skin is achieved by the flex-anchors, the stud-to-structure connection usually needs to address only the typical building movements such as floor deflections and wind and seismic drift. However, the horizontal deflection perpendicular to the plane of the panel should be limited to prevent damage to interior finishes or windows that are attached to the steel-stud frame.

3.8.6—*Surface finishes [3.8]*

Most types of surface finishes used successfully with architectural precast concrete will be acceptable on GFRC panels. The absence of large coarse aggregate in the GFRC mix allows it to follow closely the surface texture or pattern of the mold. A wide variety of surface patterns and textures can be achieved by casting the panels against form liners. It is advisable to avoid sharp angles and thin projections whenever possible and to incorporate chamfers or radii at inside corners of the form.

A smooth, off-the-form finish may be the most economical but is not recommended, because color uniformity of gray, buff, or pigmented surfaces may be difficult to achieve and the cement film on the GFRC may develop surface crazing, that is, fine and random hair-line cracks. This crazing has no structural or durability significance, but may become visually accentuated when dirt settles in the cracks. The esthetic limitations of smooth GFRC may be minimized by the shading and depth provided by creating profiled surfaces, such as fluted, sculptured, or board finishes; by subdividing the panel into smaller surface areas; by using white cement; or by using of applied coatings.

Panels can be produced with a $^1/_8$ - $^1/_2$-in. (3 to 13 mm) thick face mix with decorative aggregates. The aggregate may be exposed by retarders; sand or abrasive blasting; acid etching; or honing and polishing to produce the desired effect. Light, medium, or deep exposure of aggregates is possible.

Differential shrinkage between the face mix and the GFRC backing is important and should be considered in the mix proportions. Mix proportions should be developed such that moisture and thermal related movements between the bonded face mix and GFRC backing are dimensionally compatible.

The cement matrix also offers a wide choice of color variations through the use of gray, white, or buff-colored portland cements or through the use of color pigments. Concrete coatings or stains that are vapor permeable can be applied after adequate surface preparation.

When the surface of a GFRC panel has two or more different mixes or finishes, a demarcation feature is necessary. Different face mixes should have reasonably similar shrinkage behaviors to avoid cracking at the demarcation feature due to differential shrinkage.

Natural stone veneers (such as limestone, marble, or granite in narrow strips, small squares and rectangles, or regular-sized ashlar pieces) may also be attached to the GFRC skin.

A bond breaker between the veneer and GFRC skin is necessary to minimize bowing of the panel due to differential shrinkage.

Clay products, such as thin brick veneer, facing tile, and architectural terra cotta (ceramic veneer), may be attached to GFRC, but it is necessary to consider the differential moisture and thermal movements of the clay product facing and GFRC backing. Exact replicas of original ornamental work, such as terra cotta from historic buildings, can be made of GFRC.

Sample panels of adequate size may be necessary to translate design concepts into realistic production requirements. With any integral or attached surface finishing material, consideration must be given to the thermal and moisture induced dimensional changes and the compatibility of these dimensional changes. These considerations must account for the aged properties of the GFRC.

3.9—Surface bonding

Surface bonding is a new building concept used extensively for small commercial buildings as well as for sealing walls. Surface bonding has also been extensively used in mining applications.

Standard concrete block construction yields a wall very strong in compression, but weak in tension and flexural properties. The surface bonding concept provides properties of compression and flexure in a unique way. Concrete blocks are dry-stacked without mortar courses. Very small quantities of mortar are used on a selective basis to ensure that the concrete blocks are stacking vertically plumb to a predetermined height. After stacking, a layer of surface bonding material composed of cement, sand, and alkali resistant glass fiber is applied to the inside and outside surface to an approximate thickness of $^{3}/_{16}$ in. (5 mm). Usually the material is applied in two passes by trowel or by spray. If sprayed, the coatings are then troweled smooth. This application essentially forms a sandwich which, when fully cured, provides an extremely strong wall that is virtually airtight.

For higher walls, reinforcing steel is inserted in the vertical cores of the concrete block at specific intervals. These cores are then filled with concrete. Buildings as high as four stories have been erected using this method.

In addition, surface bonding is used extensively as a mine shaft sealant. In this particular case, a surface bonding material is applied to only one side of the concrete block wall. This system has increased in popularity because of low labor costs and the high performance of the structure.

3.10—Research recommendations

GFRC is an excellent material system producing significant weight savings in non-structural architectural cladding panels and other concrete products. It is recommended that programs generating new data on a continuing basis be encouraged. Some suggestions are listed below:

1. Research long-term strength durability of new and existing GFRC systems to evaluate both natural aging and accelerated aging techniques.

2. Research to evaluate the stability of the PEL strength of fully aged GFRC composites under cyclic environmental conditions such as wetting and drying and changes in temperature.

3. Continued research to determine characteristics of fiber-to-matrix bond, mechanisms of debonding, and fiber pullout.

4. Research to evaluate the state of microcracking that may exist at stress levels below or equal to the measured PEL.

5. Research to continue to develop guidelines for the use of applied surface treatments on GFRC products. Surface treatments include paint, stain, exposed aggregate, tile, and attached natural stone slabs. Production procedures should be documented, service performance evaluated, and the effect on long-term performance determined.

6. Research to identify architectural face mixes having properties compatible with GFRC back-up mixes in regard to temperature and moisture induced volume changes.

7. Research to evaluate the long-term performance of GFRC flex-anchor/bonding pad connections using accelerated aging procedures.

8. Research to document all design-related GFRC composite properties using the most recently introduced mix designs that have since formed the current industry standard for GFRC manufacture.

Improvements in composite performance is a challenge for every materials-oriented scientist or engineer. The work described above will provide information and accelerate improvement where needed. Research currently in progress on new mix proportions, additives, cements, and manufacturing methods continues to improve the performance and properties of GFRC.

3.11—Cited references

3.1 Proctor, B. A., "The Development and Technology of AR Fibers for Cement Reinforcement," *Proceedings*—Durability of Glass Fiber Reinforced Concrete Symposium, Prestressed Concrete Institute, Chicago, 1985, pp. 64-77.

3.2 Nippon Electrical Glass Co., "NEG AR-GLASS," *Publication* No. 2C8609, Osaka, Japan.

3.3 Majumdar, A. J., and Nurse, R. W., "Glass Fibre Reinforced Cement," *Materials Science and Engineering,* Vol. 15, 1974, pp. 107-127.

3.4 Larner, L. J.; Speakman, K.; and Majumdar, A. J., "Chemical Interactions between Glass Fibres and Cement," *Journal of Non-Crystalline Solids,* Vol. 20, 1976, pp. 43-74.

3.5 *Design Guide: Glassfibre Reinforced Cement*, Pilkington Brothers Ltd., Second Edition, Seel House Press, Liverpool, England, Jan. 1979.

3.6 Hannant, D. J., "Fibre Cements and Fibre Concretes," John Wiley and Sons, Ltd., New York, 1978, 213 pp.

3.7 PCI Committee on Glass Fiber Reinforced Concrete Panels, *Manual for Quality Control for Plants and Production of Glass Fiber Reinforced Concrete Products,* Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, 1991, 168 pp.

3.8 PCI Committee on Glass Fiber Reinforced Concrete Panels, *Recommended Practice for Glass Fiber Reinforced Concrete Panels*, Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, 1993, 99 pp.

3.9 Daniel, J. I., and Pecoraro, M. E., "Effect of Forton Polymer on Curing Requirements of AR-Glass Fiber Reinforced Cement Composites," Report to Forton, Inc., Sewickley, Pennsylvania, submitted by Construction Technology Laboratories, a Division of the Portland Cement Association, Skokie, Oct. 1982.

3.10 Mobasher, B., and Shah, S. P., "Test Parameters for Evaluating Toughness of Glass-Fiber Reinforced Concrete Panels," *ACI Materials Journal*, Sept.-Oct. 1989, pp. 448-458.

3.11 Daniel, J. I., and Schultz, D. M., "Durability of Glass Fiber Reinforced Concrete Systems," *Proceedings*—Durability of Glass Fiber Rein-

forced Concrete Symposium, Prestressed Concrete Institute, Chicago, 1986, pp. 174-198.

3.12 International Conference of Building Officials (ICBO), *Evaluation Report* 4359, July 1991, File 216.

3.13 Fordyce, M. W., and Wodehouse, R. G., "GRC and Building," Butterworth, Great Britain, 1983.

3.14 Schultz, D. M.; Daniel, J. I.; and Oesterle, R. G., "Design Considerations for GFRC Facade Panels Incorporating the Steel Stud/Flex-Anchor Connection," 6th Biennial Congress of the GRCA, Oct. 20-23, 1987, Edinburgh, Scotland, pp. 241-248.

3.15 Williamson, G. R., "Evaluation of Glass Fiber Reinforced Concrete Panels for Use in Military Construction," U.S. Army Corps of Engineers, Engineering Research Laboratory, *Technical Report* M-85/15, 1985.

3.16 Proctor, B. A.; Oakley, D. R.; and Litherland, K. L., "Developments in the Assessment and Performance of GRC over 10 years," *Composites*, Apr. 1982.

3.17 Stucke, M. J. and Majumdar, A. J., "Microstructure of Glass Fiber Reinforced Cement Composites," *Journal of Material Science*, Vol. 11, No. 6, 1976, pp. 1019-1030.

3.18 Bentur, A.; Ben-Bassat, M.; and Schneider, D., "Durability of Glass Fiber Reinforced Cements with Different Alkali Resistant Glass Fibers," *Journal of American Ceramic Society*, Vol. 68, No. 4, 1985, pp. 203-208.

3.19 Bentur, A., "Mechanisms of Potential Embrittlement and Strength Loss of Glass Fiber Reinforced Cement Composites," *Proceedings*—Durability of Glass Fiber Reinforced Concrete Symposium, Prestressed Concrete Institute, Chicago, 1985, pp. 109-123.

3.20 Bentur, A., and Diamond, S., "Aging and Microstructure of Glass Fiber Cement Composites Reinforced with Different Types of Glass Fibers," *Durability of Building Materials*, 4 (1987), pp. 201-226.

3.21 Building Research Establishment, "Properties of GRC: Ten-Year Results," *BRE Information Paper*, IP 36/79, Building Research Station, United Kingdom, Department of Environment, Garston, Watford, Nov. 1979, 4 pp.

3.22 Litherland, K. L.; Oakley, D. R.; and Proctor, B. A., "The Use of Accelerated Ageing Procedures to Predict the Long Term Strength of GRC Composites," *Cement and Concrete Research*, Vol. II, 1981, pp. 455-466.

3.23 Oakley, D. R.; Litherland, K. L.; and Proctor, B. A., "The Development of a Method of Predicting the Weathering Behaviour of Glass Reinforced Cement Composites," *Proceedings of the Second International Conference on the Durability of Building Materials and Components*, Gaithersburg, Maryland, Sept. 1981.

3.24 Aindow, A. J.; Oakley, D. R.; and Proctor, B. A., "Comparison of the Weathering Behaviour of GRC with Predictions Made from Accelerated Ageing Tests," *Cement & Concrete Research*, Vol. 14, 1984, pp. 271-274.

3.25 Proctor, B. A., "Past Development and Future Prospect for GRC Materials," *Proceedings* of the International Congress on Glass Fiber Reinforced Cement, Paris, Nov 1981.

3.26 Building Research Establishment, "GRC," *BRE Digest*, No. 216, Building Research Station, United Kingdom Department of Environment, Garston, Watford, Aug. 1978.

3.27 Building Research Establishment, "A Study of the Properties of Cem-FIL/OPC Composites," *Current Paper*, CP 38/76, Building Research Station, United Kingdom Department of Environment, Garston, Watford, June 1976.

3.28 Shah, S. P.; Ludirdja, D.; Daniel, J. I.; and Mobasher, B., "Toughness-Durability of Glass Fiber Reinforced Concrete System," *ACI Materials Journal*, Vol. 85, No. 5, Sept.-Oct. 1988, pp. 352-360.

3.29 Proctor, B. A., "Long Term Strength Properties of GRC," *Proceedings*, Composite Materials in Buildings: State of the Art, Research and Prospects, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Milano, Italy, May 1990.

3.30 Bijen, J. M., "Curing of GRC," Sixth Biennial Congress of the Glassfibre Reinforced Cement Association, Edinburgh, Scotland, Oct. 1987, pp. 71-77.

3.31 Van der Plas, C., "The Many Improvements of GRC by Polymer Addition," Eighth Biennial Congress of the Glassfibre Reinforced Cement Association, Maastricht, The Netherlands, Oct. 1991, pp. 13-21.

3.32 McDonald, B. M.; Burke, M. A.; and Moncarz, P. D., "The Effects of Natural Aging on a Polymer Modified Glass Fiber Reinforced Concrete," Eighth Biennial Congress of the Glassfibre Reinforced Cement Association, Maastricht, The Netherlands, Oct. 1991, pp. 125-134.

3.33 Bijen, J., "Improved Mechanical Properties of Glass Fibre Reinforced Cement by Polymer Modification," *Cement & Concrete Composites*, Vol. 12, 1990, pp. 95-101.

3.34 Bijen, J., "E-Glass Fibre-Reinforced Polymer-Modified Cement," *Proceedings of the International Congress on Glass Fibre Reinforced Cement*, London, Oct. 10-12, 1979, pp. 62-67.

3.35 Bijen, J., and Jacobs, M., "Properties of Glass Fiber-Reinforced Polymer Modified Cement," *Journal of Materials and Structures*, Vol. 15, No. 89, Sept.-Oct. 1981, pp. 445-452.

3.36 Jacobs, M. J. N., "Forton PGRC—A Many Sided Construction Material," Department of Material Application Development, DSM-Central Laboratory, Geleen, The Netherlands, Oct. 1981.

3.37 Bijen, J., "Glassfibre Reinforced Cement: Improvement by Polymer Addition," *Symposium: Advanced Cement Composites*, American Material Society Annual Meeting, Boston, Nov. 1980, pp. 239-249.

3.38 Bijen, J., "Durability of Some Glass Fiber Reinforced Cement Composites," ACI JOURNAL, July-Aug. 1983, pp. 305-311.

3.39 West, J. M.; DeVekey, R. C.; and Majumdar, A. J., "Acrylic Polymer Modified GRC," *Composites*, Vol. 16, No. 1, Jan. 1985.

3.40 Knowles, R. P. and Proctor, B. A., "The Properties and Performance of Polymer Modified GRC," *Proceedings of the 6th Biennial International Congress of the GRCA*, Edinburgh, Oct. 1987, pp. 79-89.

3.41 Ball, H. P., "The Effect of Forton Compound on GFRC Curing Requirements," *Proceedings of the 4th Biennial Congress of the GRCA*, Stratford-Upon-Avon, U.K., Oct. 1983, pp. 56-65.

3.42 Hayashi, M.; Sato, S.; and Fujii, H., "Some Ways to Improve Durability of GFRC," *Proceedings*—Durability of Glass Fiber Reinforced Concrete Symposium, Prestressed Concrete Institute, Chicago, 1985, pp. 270-284.

3.43 Bentur, A., and Diamond, S., "Effects of Direct Incorporation of Microsilica into GFRC Composites on Retention of Mechanical Properties After Aging," *Proceedings*—Durability of Glass Fiber Reinforced Concrete Symposium, Prestressed Concrete Institute, Chicago, 1986, pp. 337-356.

3.44 Bijen, J., "A Survey of New Developments in Glass Composition, Coatings and Matrices to Extend Service Lifetime of GFRC," *Proceedings*—Durability of Glass Fiber Reinforced Concrete Symposium, Prestressed Concrete Institute, Chicago, 1986, pp. 251-269.

3.45 Thiery, J., and Genis, A., *High Durability Glass Cement Composites: New Vetrotex System*, St. Gobain, Centre de Recherches de Pont-a-Mousson S.A., France, 1990, 10 pp.

3.46 Soukatchoff, P., and Ridd, P. J., "High Durability Glass Fibre Reinforced Cement Using a Modified Cementitious Matrix," Eighth Biennial Congress of the Glassfibre Reinforced Cement Association, Maastricht, The Netherlands, Oct. 1991, pp. 45-60.

3.47 Gartshore, G. C., "A New High Durability Cement for GRC Products," Eighth Biennial Congress of the Glassfibre Reinforced Cement Association, Maastricht, The Netherlands, Oct. 1991, pp. 3-11.

3.48 Gartshore, Gavin, "A Recent Development for GRC Composites," *The Review, Design & Architecture*, Stoudgate Publications, Ltd., London, 1991, p. 147.

3.49 Harmon, T., and Molloy, H. J., "Some Issues of Durability and Shrinkage in GFRC," Eighth Biennial Congress of the Glassfibre Reinforced Cement Association, Maastricht, The Netherlands, Oct. 1991, pp. 22-35.

3.50 Smith, J. W., and Walker, T. W. D., "Applications of Glass-Fibre Reinforced Cement," Proceedings of the Symposium on Fibrous Concrete held in London, Construction Press Ltd., Lancaster, England, Apr. 1980, pp. 174-188.

3.51 Tallentire, A. G., "The Historical Techno-Commercial Development of GFRC, Together with Major European Advances Made in This New Composite Field During the Past Ten Years," *Proceedings*—Durability of Glass Fiber Reinforced Concrete Symposium, Prestressed Concrete Institute, Chicago, 1985, pp. 4-23.

3.52 Daniel, J. I.; Roller, J. J.; Weinmann, T. L.; Oesterle, R. G.; and Shultz, D. M., "Quality Control and Quality Assurance for the Manufacture and Installation of GFRC Facades," Seventh Biennial Congress of the Glassfibre Reinforced Cement Association, Maastricht, The Netherlands, Sept. 1989, pp. 243-266.

3.53 Hanson, N. W.; Roller, J. J.; Daniel, J. I .; and Weinmann, T. L., *Manufacture and Installation of GFRC Facades,* SP 124, American Concrete Institute, Detroit, 1990, pp. 183-213.

3.54 Oesterle, R. G.; Schultz, D. M.; and Glikin, J. D., *Design Considerations for GFRC Facades*, SP 124, American Concrete Institute, Detroit, 1990, pp. 157-182.

CHAPTER 4—SYNTHETIC FIBER REINFORCED CONCRETE (SNFRC)

4.1—Introduction

A variety of fiber materials other than steel, glass, or natural fibers have been developed for use by the construction industry for fiber reinforced concrete. These fibers are categorized as synthetic fibers for use in synthetic fiber reinforced concrete, SNFRC for identification.

4.1.1—*Synthetic fiber types*

Synthetic fibers are man-made fibers resulting from research and development in the petrochemical and textile industries. SNFRC utilizes fibers derived from organic polymers which are available in a variety of formulations. Fiber types that have been tried in portland cement concrete based matrices are: acrylic, aramid, carbon, nylon, polyester, polyethylene and polypropylene. For many of these fibers, there is little reported research or field experience, while others are found in commercial applications and have been the subject of extensive reporting.

Table 4.1 summarizes the range of physical properties of selected synthetic fiber types. The effect of temperature on synthetic fibers is shown in this table by listing the temperature at which fibers melt, oxidize, or decompose. Synthetic fibers are said to be melted when the crystalline portions of the polymers that they are made of are converted on heating from a solid to a glassy or liquid state. The temperature at which this physical change occurs is called the melting point. If on heating a fiber decomposes before it melts, it is because one of many possible chemical reactions as occurred at a lower temperature before reaching the melting point. A typical type of decomposition is oxidation. Oxidation is caused by the chemical reaction of the fiber with the oxygen in the air. The temperature at which a decomposition occurs is called the decomposition temperature. Decomposition is usually noticed because the fiber quickly changes color, fumes or undergoes an obvious chemical change.

4.1.2—*Historical background*

Twentieth century interest in synthetic fibers as a component of construction materials was first reported in 1965 [4.1]. Synthetic monofilament fibers were used in blast resistant structures for the U.S. Army Corps of Engineers Research and Development Section [4.2]. The fibers were of a size and shape (geometry) similar to that which was then being tested using steel fibers (SFRC) and glass fibers (GFRC). They were one-half to one inch (13 to 25 mm) in length with a fiber aspect ratio (length to diameter, l/d) of between 50 and 100. In this project, it was also discovered that the addition of what then was considered small quantities, 0.5 percent by volume, of synthetic fibers to concrete resulted in a composite with increases in both ductility and impact resistance [4.2]. However, it was another fifteen years before large scale development activities began with synthetic fibers.

Since the time of this early work, commercially available synthetic fibers in the 6 to 60 denier range have been shown to better distribute cracking, reduce crack size, and improve other properties of concrete as discussed later in this report. The earlier applications of synthetic fibers first used in the late 1970s had denier in the 300 to 400 range and lower aspect ratios. The finer denier fibers were used through the 1980s.

Applications with finer denier fibers, that is, relatively small diameter and high aspect ratio fibers, began with fiber volume percentages of approximately one-fifth of that which had been previously used with the coarser fibers. These low volume applications appeared at 0.1 to 0.3 percent by volume. However, even at these low volume additions, the fiber count (number of fibers in a unit volume of matrix) and specific surface (surface area of fibers per unit volume of matrix) are comparable with values found with higher volume percentages of coarser size fibers.

4.1.3—*Developing technologies*

With the emergence of new areas of application, research interest has moved to higher fiber contents where toughness index and other factors are design considerations. Toughness index is an indication of the load-carrying capabilities of the fibers within the concrete matrix after first crack.

Basically, cast-in-place concrete will accommodate up to 0.4 percent by volume of synthetic fibers with minimal mix proportion adjustments. Wet mix shotcrete with up to 0.75 percent by volume will provide major increases in toughness index values [4.3]. Fiber length and fiber configuration are important factors at this fiber content. In slab-on-grade applications, with collated fibrillated polypropylene fiber contents up to 0.3 percent by volume, the fatigue strength has increased dramatically [4.4].

The use of synthetic fibers in the form of layered mesh is similar in concept to the system known as ferrocement. Progress in research and in the development of commercial products has been rapid and has been reported in publications on ferrocement in the U.S. and in publications on fiber reinforced concrete principally in Europe. Readers interested in this development should refer to the work of ACI Committee 549.

4.2—Physical and chemical properties of commercially available synthetic fibers

The durability and chemical compatibility of fibers in the particular encapsulating matrix must be individually determined. The fibers indicated below have generally performed well in portland cement matrices. Fiber manufacturers and suppliers should confirm the suitability of their fibers for the intended application through independent third-party testing.

4.2.1—*Acrylic*

Acrylic fibers contain at least 85 percent by weight of acrylonitrile units. Selected properties of acrylic fibers are shown in Table 4.1. Generally, acrylic fibers used in the textile industry have a tensile strength ranging from 30 to 50 ksi (207 to 345 MPa). However, special high tenacity acrylic fi-

Table 4.1— Selected synthetic fiber types and properties*

Fiber type	Equivalent diameter, in. x 10^{-3}	Specific gravity	Tensile strength, ksi	Elastic modulus, ksi	Ultimate elongation, percent	Ignition temperature, degrees F	Melt, oxidation, or decomposition temperature, degrees F	Water absorption per ASTM D 570, percent by weight
Acrylic	0.5-4.1	1.16-1.18	39-145	2000-2800	7.5-50.0	—	430-455	1.0-2.5
Aramid I	0.47	1.44	425	9000	4.4	high	900	4.3
Aramid II†	0.40	1.44	340	17,000	2.5	high	900	1.2
Carbon, PAN HM‡	0.30	1.6-1.7	360-440	55,100	0.5-0.7	high	752	nil
Carbon, PAN HT§	0.35	1.6-1.7	500-580	33,400	1.0-1.5	high	752	nil
Carbon, pitch GP**	0.39-0.51	1.6-1.7	70-115	4000-5000	2.0-2.4	high	752	3-7
Carbon, pitch HP††	0.35-0.70	1.80-2.15	220-450	22,000-70,000	0.5-1.1	high	932	nil
Nylon‡‡	0.90	1.14	140	750	20	—	392-430	2.8-5.0
Polyester	0.78	1.34-1.39	33-160	2500	12-150	1100	495	0.4
Polyethylene‡‡	1.0-40.0	0.92-0.96	11-85	725	3-80	—	273	nil
Polypropylene‡‡	—	0.90-0.91	20-100	500-700	15	1100	330	nil

*Not all fiber types are currently used for commercial production of FRC.
†High modulus.
‡Polyacrylonitrile based, high modulus.
§Polyacrylonitrile based, high tensile strength.
**Isotropic pitch based, general purpose.
††Mesophase pitch based, high performance.
‡‡Data listed is only for fibers commercially available for FRC.
Metric equivalents: 1 in. = 25.4 mm; 1 ksi = 6.895 MPa; (degrees F - 32)/1.8 = degrees C.

bers have been developed to replace asbestos fiber in many fiber reinforced concrete products. These fibers have tensile strengths of up to 145 ksi (1000 MPa) [4.5, 4.6].

4.2.2—*Aramid*

Aramid (aromatic polyamide) is a high-modulus, man-made polymeric material that was first discovered in 1965. After many years of experimental research, a method to produce that material in fiber form was finally developed. Aramid fibers were initially produced for commercial applications by the early 1970s. Attempts to incorporate this fiber into concrete as a form of reinforcement began by the late 1970s. It has been concluded that the mechanical properties of a cement matrix reinforced with aramid fibers are sufficiently attractive to warrant further studies [4.7]. However, the high cost of aramid fibers has been a limitation to commercial acceptance.

Aramid fibers have relatively high tensile strength and a high tensile modulus, as shown in Table 4.1. Aramid fibers are two and a half times as strong as E-glass fiber and five times as strong as steel fibers per unit weight.

The strength of aramid fiber is unaffected up to 320 F (160 C). Aramid fiber exhibits dimensional stability up to 392 F (200 C) and is creep resistant [4.8, 4.9]. Aramid strand with different numbers of fibers of varying diameter is also available.

4.2.3—*Carbon*

Carbon fibers were developed primarily for their high strength and stiffness properties for applications within the aerospace industry. Compared with most other synthetic fiber types, carbon fibers are expensive and, as previously mentioned with aramid fibers, this has limited commercial development. However, laboratory research has continued to determine the physical properties of carbon fiber reinforced concrete (CFRC) [4.10-4.18].

Carbon fibers have high tensile strength and elastic modulus as shown in Table 4.1. They are also inert to most chemicals. Polyacrylonitrile (PAN) based carbon fibers are manufactured by carbonizing polyacrylonitrile yarn at high temperatures while aligning the resultant graphite crystallites by a process called “hot-stretching.” They are manufactured as either HM (high modulus) fibers or HT (high-tensile strength) fibers and are dependent upon material source and extent of hot-stretching for their physical properties. They are available in a variety of forms.

It has been shown that carbon fibers can be made from petroleum and coal pitch, which are less expensive than the polyacrylonitrile fiber used to make PAN based carbon fiber. Pitch based fibers are also manufactured in two types. General purpose (GP) fibers are made from isotropic (non-oriented fiber structure) pitch and are low in tensile strength and elastic modulus. High performance (HP) fibers are made from mesophase (highly oriented fibers) pitch which produces fibers with high tensile strength and high elastic modulus.

Carbon fiber is typically produced in tows (strands) that may contain up to 12,000 individual filaments. Tows are commonly pre-spread prior to incorporation in CFRC to facilitate cement matrix penetration and to maximize fiber effectiveness.

4.2.4—*Nylon*

Nylon is a generic name that identifies a family of polymers characterized by the presence of the amide functional group—CONH [4.19]. Various types of nylon fibers exist in the marketplace for use in apparel, home furnishings, industrial, and textile applications. A nylon fiber’s properties are imparted by the base polymer type (molecular weight, end groups, residual monomer, etc.), addition of different levels of additives (light and heat stabilizers, delusterants, etc.), manufacturing conditions (spinning, drawing, texturing, etc.), and fiber dimensions (cross-sectional shape and area, fiber length, etc.). Currently, only two types of nylon fiber are marketed for fiber reinforced concrete. They are nylon 6 and nylon 66.

Nylon fibers are spun from nylon polymer. The polymer is transformed through extrusion, stretching, and heating to form an oriented, crystalline, fiber structure. In addition to conventional yarns produced by standard drawing, nylon fiber properties may be enhanced by special treatments including over finishing, heating, air texturing, etc. Nylon fibers are available as multifilament yarns, monofilament, staple, and tow. For concrete applications, high tenacity (high tensile strength) heat and light stable yarn is spun and subsequently cut into shorter lengths.

Nylon fibers exhibit good tenacity, toughness, and excellent elastic recovery [4.20]. Selected properties for nylon fibers are shown in Table 4.1. Nylon is very heat stable and is readily used in commercial applications requiring this property, such as tires [4.20]. Nylon is hydrophilic, with a moisture regain of 4.5 percent [4.21]. The moisture regain property does not affect concrete hydration or workability at low prescribed contents ranging from 0.1 to 0.2 percent by volume, but should be considered at higher fiber volume contents. Nylon is a relatively inert material, resistant to a wide variety of organic and inorganic materials including strong alkalis. It has been shown to perform well under accelerated aging conditions [4.22].

4.2.5—*Polyester*

Polyester fibers—for example, polyethylene terephthalate (PET)—are available only in monofilament form. Denier of polyester fibers used in cement composites ranges from 15 to 100 [4.23]. To date, polyester fibers available to the concrete industry belong to the thermoplastic polyester subgrouping. This type of polyester exhibits physical and chemical characteristics that depend on manufacturing techniques. Selected fiber properties are shown in Table 4.1. One of several techniques involves the production of highly crystalline pellets, which are converted to filaments in a melt extraction process and subsequently stretched approximately 400 percent before cutting to desired length.

All thermoplastics are temperature sensitive. At temperatures above normal concrete service temperatures, fiber characteristics are altered. Temperatures above 536 F (280 C) cause molecular breakdown [4.20].

Polyester fibers are somewhat hydrophobic (do not absorb much water) and have been shown not to affect the hydration of the portland cement concrete [4.24]. Bonding of polyester fibers within the cement matrix is mechanical.

There is no consensus on the long-term durability of polyester fibers in portland cement concrete.

4.2.6—*Polyethylene*

Polyethylene has been produced for use as concrete reinforcement [4.25] in monofilament form with wart-like surface deformations along the length of the fiber. These deformations are intended to improve the mechanical bonding in cement paste and mortar. Selected fiber properties are shown in Table 4.1.

It has been reported that polyethylene fibers could be easily dispersed in concrete mixtures in volume percentages of up to 4 percent using conventional mixing techniques [4.26]

Polyethylene in pulp form has also been applied in concrete mixtures. In this application the pulp, a fine irregular form of fiber, acts to retain cement fines by acting as filter fibers [4.27-4.29] and its use is intended as an alternate to the use of asbestos fibers.

4.2.7—*Polypropylene*

Monofilament form fibers are produced in an extrusion process in which the material is hot drawn through a die of circular cross section, generating a number of continuous filaments at one time called a tow.

Fibrillated polypropylene fibers are the product of an extrusion process where the die is rectangular. The resulting film sheets of polypropylene are slit longitudinally into equal width tapes. To achieve a lattice pattern, the tape is mechanically distressed or fibrillated with a patterned pin wheel or split film technique to produce the main and cross fibril networks. In some cases, the fibrillated tape is twisted prior to cutting to enhance the opening of the bundle. Fibers thus produced are termed collated, fibrillated polypropylene and are cut to desired lengths [4.14, 4.30].

Selected properties of polypropylene fibers are shown in Table 4.1. Polypropylene is hydrophobic, meaning it does not absorb water. Polypropylene fibers are not expected to bond chemically in a concrete matrix, but bonding has been shown to occur by mechanical interaction [4.31]. Polypropylene fibers are produced from homopolymer polypropylene resin. The melting point and elastic modulus, which are low relative to many other fiber types, may be limitations in certain processes such as autoclaving [4.32]. However, refractory product manufacturers use polypropylene fibers for early strength enhancement and because they disappear at high temperatures, providing a system of “relief channels” for use in controlling thermal and moisture changes.

4.3—Properties of SNFRC

Design methods for particular applications using low volume synthetic fibers have not yet been developed. Depending on the intended application, different manufacturers may suggest different volume content and fiber geometry. Acceptance criteria are prescribed in the ASTM Standard Specification C 1116 [4.33].

Reports on compression strength, splitting tensile strength, and flexural strength tests generally result in the conclusion that significant improvement in these strength properties will not be observed in mature specimens when synthetic fibers are applied at relatively low (0.1 to 0.2) volume percentages [4.34]. However, synthetic fibers have been shown to be effective in the early lifetime of the composite when the matrix is itself weak, brittle, and of low modulus. For mature concrete, improved material toughness is dependent on the fiber volume content and fiber durability in the matrix.

Improved toughness and crack control properties with SNFRC have been demonstrated for some fiber types [4.35]. Test methods used for flexural strength and toughness testing of FRC have been published [4.36, 4.37]. These methods have been applied to SNFRC as have other specialized tests, such as for shrinkage and crack control. Work on standard test procedures to evaluate shrinkage and crack control is presently being undertaken by ASTM Subcommittee C09.42.

The bonding of current commercially available synthetic fibers (nylon, polyester, and polypropylene) within the concrete matrix is mechanical. There is no chemical bond. The modulus of elasticity and Poisson’s ratio of each material will have an effect on bonding properties as will the fiber geometry and type derived from monofilament or fibrillated tape. Tests like the drop weight impact test and the toughness index test will show the bonding potential of various fiber types as well as the effect of other parameters such as fiber volume, fiber configuration, and fiber length.

4.3.1—*Acrylic FRC*

Acrylic fibers have been applied in cement-based composites as a replacement for asbestos fiber. In this process, fibers are initially dispersed in a dilute water and cement mixture. A pressure forming process follows in combination with vacuum dewatering. Composite thickness is built up in layers and the finished product has a low water to cement ratio and has sufficient pre-set and pre-hardened strength permitting it to be handled immediately [4.5, 4.42]. In this method other fibers, termed process fibers, are added to maintain mixture homogeneity and reduce segregation during vacuum dewatering. These are generally cellulose or polyfiber pulp fibers.

Acrylic fibers have also been added at low volumes in conventional batch mixing processes to reduce the effects of plastic shrinkage cracking [4.6, 4.41]. This application is similar to that discussed for polypropylene fibers, although far less field experience or research has been reported.

One study has provided data regarding the effects of certain manufacturing parameters on the performance of composites reinforced with high-tenacity acrylic fibers [4.5]. This research was conducted to determine the effects of acrylic fiber content, process fiber content and type, and pressing pressure used during fabrication, on the mechanical properties of the product. Composites were fabricated using vacuum-dewatering and pressing techniques in an attempt to simulate the Hatschek process, which is normally used for commercial, large-scale production of fiber-cement board. Flexural strength tests were used as a basis for evaluating composite performance. The Hatschek process was developed in 1898 by Ludwig Hatschek. When producing composites using the Hatschek process, the fibers are initially dispersed in a dilute water/cement mixture. During the fabri-

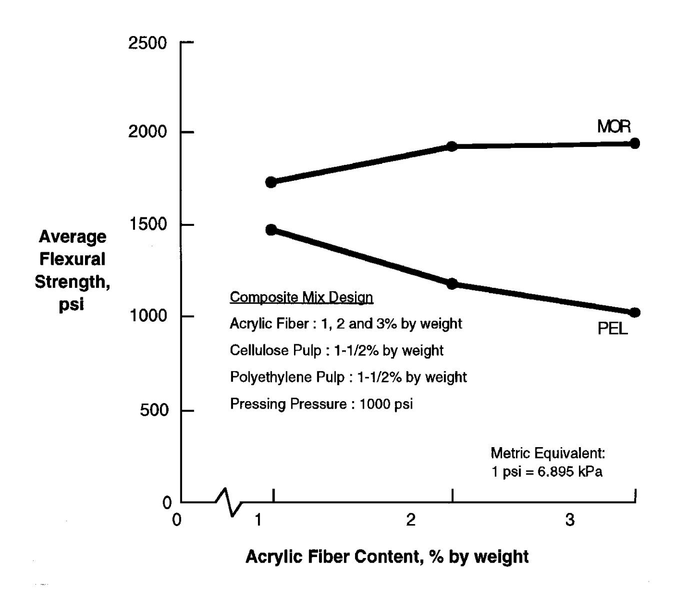


Fig. 4.1—Average flexural strength versus acrylic fiber content

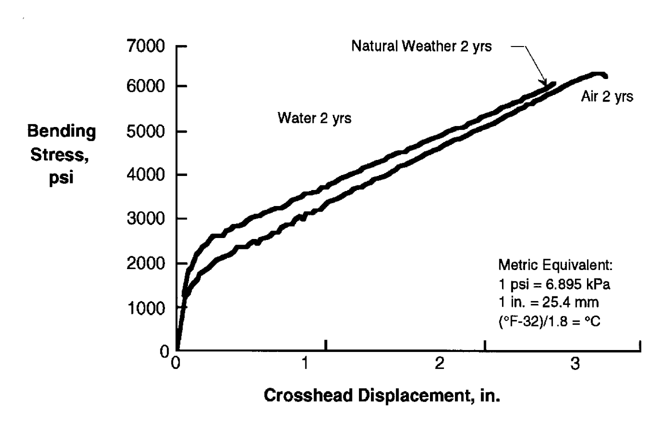


Fig. 4.2—Flexural strength of aramid FRC (1.78 percent fibers by volume) after two years of aging

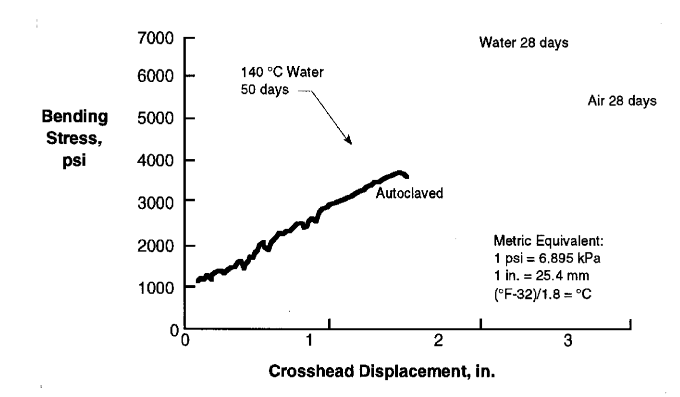


Fig. 4.3—Flexural strenngth of aramid FRC (1.78 percent fibers by volume) after autoclaving and after aging for several weeks

cation process, a great deal of the initial mixing water is removed through vacuum-dewatering. Composite thickness is gradually built up by layering. Finally, the composite is pressed to densify and remove still more of the water. Finished composites have very low water-cement ratios and sufficient "green strength" to be handled immediately [4.5, 4.42].

In one test series, acrylic fiber contents ranged from 1 to 3 percent by weight. Process fibers used for cement retention in these specimens consisted of $1^1/_2$ percent by weight of cellulose pulp in conjunction with $1^1/_2$ percent by weight of polyethylene pulp. Average flexural strength versus acrylic fiber content is shown in Fig. 4.1. As indicated by this figure, there is a trend for the Modulus of Rupture (MOR) to increase and the Proportional Elastic Limit (PEL) to decrease as the primary acrylic fiber content increases [4.5]. The investigation also determined that the total weight percentage of process fibers used had little effect on the average flexural strength of composites. Also, average flexural strength increased as pressing pressure used during fabrication increased from 500 to 1500 psi (3.5 to 10.5 MPa) [4.5].

4.3.2—*Aramid FRC*

Aramid fiber reinforced cement composites can be fabricated using conventional mixing and forming techniques or by using fabrication processes similar to those used to make asbestos cement products [4.8, 4.9]. Because aramid fibers are comparatively more expensive than other polymeric fibers, aramid fiber reinforced concrete has primarily been used as an asbestos cement replacement in certain high stress applications. As with other asbestos replacement fibers, aramid fibers exhibit poor filtration characteristics when used in the Hatschek fabrication process. They should therefore be used with a suitable filtration fiber whenever the Hatschek or similar fabrication method is employed [4.25].

Aramid FRC composites have also been prepared using a spray-suction technique [4.7]. With this technique, aramid fibers and an atomized cement slurry were supplied from separate sources and sprayed simultaneously onto a flat surface to achieve a random fiber distribution. Excess water was removed from the resulting mixture using suction from below, and the top surface was troweled flat. Fiber contents of up to 2 percent by volume were obtained [4.7].

Results of tensile, flexural, and the Izod impact tests for test specimens subjected to various curing conditions are reported in Table 4.2 [4.14].

Curing and aging conditions were varied among the test specimens. The test results were compared with results from tests performed on "control" specimens in order to assess the long term strength durability of the aramid FRC. The control specimens were subjected to a normal 28-day moist cure prior to testing. The test results as shown in Table 4.2 indicated the following [4.14]:

1. For three selected curing environments (two years in water at 68 F [20 C], two years in air at 68 F [20 C], and two years in natural weathering at Garston, U.K.) the UTS and MOR did not decrease. For the air storage condition, the strain to failure and impact strengths increased and the PEL stress decreased. For the water storage condition, the strain to failure and the impact strength decreased.

2. Material behavior for underwater storage at 140 F (60 C) was similar to that observed after storage at 68 F (20 C).

3. Exposure in air at 300 F (150 C) for 45 days resulted in a slight decrease in tensile PEL and UTS.

Table 4.2— Material properties of aramid fiber reinforced concrete composites

Curing/aging conditions		Tensile properties					Bending properties				Impact strength, ft-lb/in.^{2}
		UTS stress, psi	UTS strain, percent	PEL stress, psi	PEL strain, millionths	Young's Modulus, ksi	MOR stress, psi	PEL stress, psi	PEL strain, millionths	Modulus of elasticity, ksi	
Water 68 F	28 days 180 days 2 years	2335 2175 1970	1.53 1.28 1.08	1285 1340 1030	318 252 210	4045 5380 4915	6440 6440 6310	2235 2365 2565	891 773 850	2900 3115 3250	8.1 7.0 5.7
Air 68 F	180 days 2 years	2088 2146	1.79 1.69	1050 554	265 167	3990 3495	6775 6585	1825 1395	853 587	2235 2540	8.4 10.5
Weather	2 years	2088	1.40	685	168	4105	6315	2275	768	3205	6.7
Water 140 F	7 days 50 days 180 days	2130 2390 1780	1.24 1.26 1.11	1295 1045 910	258 230 185	4945 4555 4915	5730 6020 5540	1915 1855 2305	713 785 710	2725 2320 3320	8.1 5.9 5.2
Air 300 F	7 days 45 days	1900 1755	1.69 1.91	1075 530	348 252	3335 2335	4990 5455	1985 1990	1300 964	1665 2405	7.1 9.5
Autoclave 180 F	16 hrs	1365	1.14	805	212	3990	3610	1915	1290	1535	7.5
Control	28 days	1940	1.41	1110	283	3930	5280	1740	883	1985	10.9

Metric equivalents: 1 ksi = 1000 psi = 6.895 MPa; 1 ft-lb/in^2 = 2.102 kJ/m^2; (deg F-32)/1.8 = deg C.

4. Tensile, flexural, and impact strengths for the autoclaved specimens were approximately 30 percent less than strengths for the control specimens.

Figure 4.2 shows the composite behavior in flexure after two years of aging in various environments. Figure 4.3 shows the composite behavior in flexure after autoclaving and after several weeks of aging in various environments. These test results indicated that aramid FRC composites can be expected to retain most of their initial strength and ductility after long periods of exposure in adverse environments [4.7, 4.14].

Cyclic flexural loading was conducted to evaluate the fatigue resistance of aramid FRC composites. Test results indicated that the composite was resistant to fatigue at stresses significantly greater than the Proportional Elastic Limit (PEL). No failures were recorded below the PEL (approximately 2175 psi [15 MPa]) after one million loading cycles [4.7, 4.14].

Tension tests were conducted to evaluate the effects of different fiber contents on tensile strength of aramid FRC composites. Fiber contents ranged between zero and 2 percent by volume and the fiber orientation was unidirectional. Results indicated that the Bend-Over-Point (BOP) decreased for fiber contents above 1.45 percent. However, the UTS, Young's Modulus, and toughness increased as fiber contents increased.

Researchers [4.43] have demonstrated the performance, particularly in toughness, impact resistance, and flexural performance, of aramid fiber reinforced cement, concrete, and mortar. The relative cost of these fibers has limited widespread application.

4.3.3—*Carbon FRC*

Carbon fiber reinforced concrete (CFRC) may be fabricated by batch casting. Carbon fiber can be incorporated into a cement matrix as individual fibers. Fibers incorporated during the batch mixing process are oriented randomly throughout the mix.

A satisfactory mix of chopped carbon fiber, cement, and water is difficult to achieve because of the large surface area of the fiber. Uniform dispersion of discontinuous low modulus carbon fibers can be achieved [4.44] by use of a high energy flexible base-type mixer, the addition of methyl cellulose, and the use of a defoaming agent to eliminate air bubble formation. The use of condensed silica fume along with a proper dose of superplasticizer is reported to be an effective way of obtaining a uniform distribution in a cement paste [4.45, 4.46].

The effects of fiber orientation and distribution in carbon fiber reinforced concrete composites has been reported [4.11]. Instrumented impact test results using low modulus carbon fibers demonstrated substantial increases in impact strength and fracture energy in proportion to the volume fraction of fibers used [4.45].

Strength retention with age for composites was measured after storing specimens in water at 64 and 122 F (18 and 50 C) for one year [4.11]. Little change in strength was reported. This trend was confirmed with the report that no significant loss of strength was found for composite specimens stored under water at 140 F (60 C) for one year. These com-

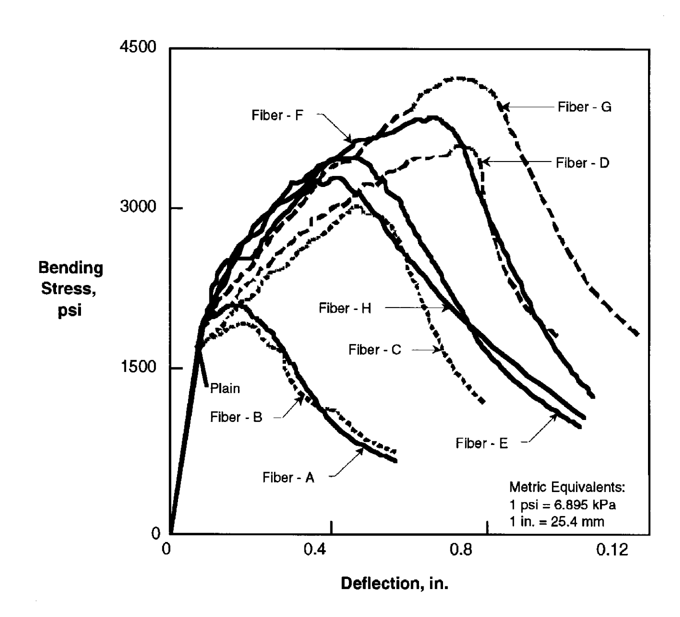


Fig. 4.4—Typical bending stress versus deflection curves for composites containing 3 percent by volume of carbon fibers of various tensile strengths

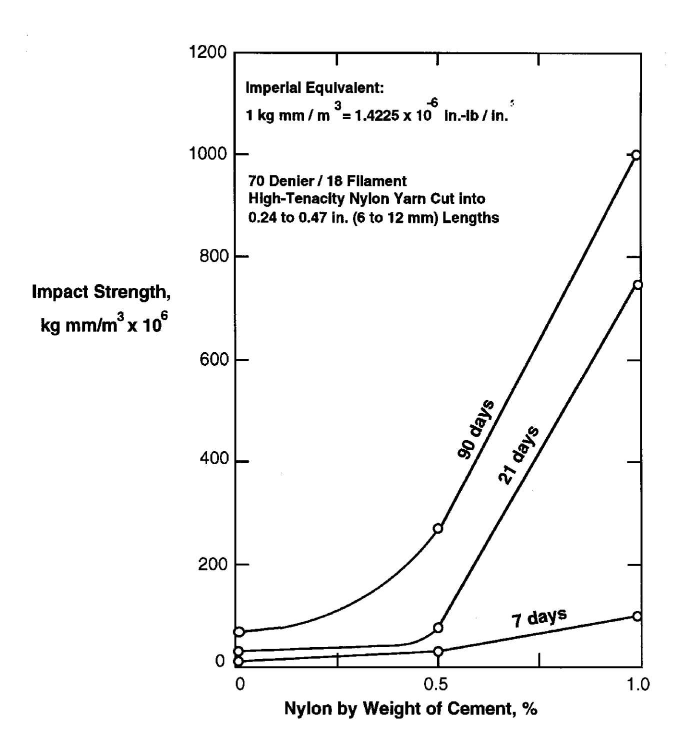


Fig. 4.5—Nylon content versus impact strength at different ages

posite specimens were produced by the sprayed-dewatered process and used two different fiber lengths, 0.43 in. (11 mm) and 1.25 in. (32 mm), and contained 0.6 to 1.3 percent fiber by weight [4.11].

In another report [4.13], information on several other engineering properties of CFRC has shown that the addition of carbon fibers results in improved impact strength, fracture toughness, and dimensional stability. Both impact strength

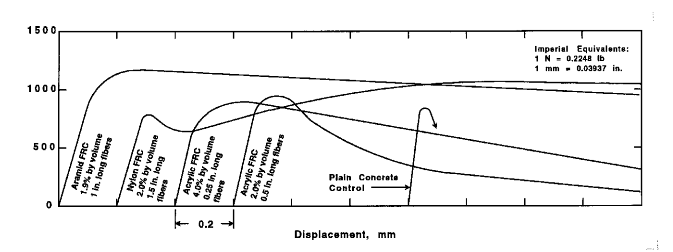


Fig. 4.6—Load versus load-line displacement curves for acrylic, aramid, and nylon FRC

and fracture toughness of composites increased with increase in fiber content. Measured shrinkage of composites containing approximately 6 percent high-modulus carbon fiber by volume was reportedly one-tenth that of the unreinforced cement matrix. Similarly, expansion of composites stored in water was also less than that of the unreinforced cement matrix. Reduction in creep strain was also noted due to the addition of carbon fibers.

The same study also investigated the effects of carbon fiber addition on creep caused by static sustained loads and fatigue due to dynamic loads [4.13]. Results of dynamic load tests indicate that CFRC composites initially decrease in strength due to fatigue and then level off at some limiting strength. This limiting strength was found to be much greater than the matrix cracking strength. Results of static load tests indicate ultimate strength reductions due to sustained loads even when the applied stress was less than the matrix cracking strength [4.13].

Another study reported the effects of the tensile strength of low modulus pitch-based carbon fibers on the flexural strength of CFRC composites [4.46]. Table 4.3 shows the tensile strength, elastic modulus, and elongation for each of the fiber types considered in the tests. Figure 4.4 shows the bending stress-deflection curves obtained for composites containing each fiber type. According to the results, the tensile strength of the fiber should be greater than 93 ksi (640 MPa) in order to reinforce the cement matrix effectively. Composites contained 3 percent carbon fiber by volume. Fibers were 0.40 in. (10 mm) long and were randomly dispersed in the cement matrix.

4.3.4—*Nylon FRC*

Nylon fiber was one of the earliest fiber types evaluated for use in concrete. Initial interest stemmed from the Army Corps of Engineers, whose primary purpose was to develop blast-resistant concrete [4.1, 4.2]. It was found that nylon fibers were particularly effective in controlling the impact forces present in a blast situation, as measured by fragment velocity, percent slab intact, and distance to the farthest fragment. One study confirms nylon's ability to resist impact forces as a result of blast. In this study, 3.28 ft (1.0 m) hollow cubes were reinforced on two adjoining sides with 12 percent by weight of 0.24 and 0.47 in. (6 and 12 mm) long fibers, respectively. The hollow cubes were filled with water and a 1.76 oz (50 gm) explosive placed in the center. The authors confirmed the ability of nylon fibers to withstand blast effects and act as a crack arrestor [4.47].

The ability of nylon fibers to impart impact resistance and flexural toughness is well documented [4.1, 4.18, 4.47-4.51]. One study [4.50] of nylon FRC reports Izod impact strengths ranging from 4.5 to 17.1 ft-lb/in. (0.24 to 0.91 Nm/mm) versus 0.64 ft-lb/in. (0.03 Nm/mm) for plain concrete. Experimental variables including fiber denier (15d to 235d), fiber content (2 to 3 percent by weight), and curing conditions (moist vs. dry) accounted for the range in impact strengths. Another evaluation [4.47] of nylon FRC at a fiber content of 0.5 percent by weight using a drop weight setup revealed impact strengths 5 times greater than plain concrete. At a fiber content of 1 percent by weight, the impact strength was 17 times greater than plain concrete as shown in Fig. 4.5. The nylon evaluated was a 70 denier/18 filament high tenacity yarn cut into 0.24 to 0.47 in. (6 to 12 mm) lengths at contents of 0.5 to 1.0 percent by weight of cement. A third testing program examining the effects of several parameters including fiber denier (4 to 50d), fiber length (0.5 to 2 in. [13 to 51 mm]), curing condition, and fiber content (0.5 to 4.0 percent by weight) shows nylon to increase impact resistance from 7.5 to 15 times that of plain concrete. The Izod Pendulum method was also used in this evaluation [4.18].

Several researchers have shown significant improvement in toughness, ductility, and control of cracking with the use of nylon fibers at contents ranging from 0.5 to 3 percent by volume [4.22, 4.48, 4.49]. One particular study, using a Type III (high early strength) cement and silica sand matrix, measured first-crack stress, maximum strength, and toughness using a compact tension test. Notched specimens were subjected to a four point bending load. A clip gauge was attached to the specimen crack mouth to measure load-line displacement. As shown in Fig. 4.6, the data indicated a modest increase in first-crack stress and maximum strength while the ability to absorb energy in the post-crack region (toughness) improved dramatically with the addition of 2 to 3 percent by volume of nylon fibers [4.49].

Nylon has been shown to be particularly effective in sustaining and increasing the load carrying capability of con-

Table 4.3— Mechanical properties of carbon fibers

Fiber type	Tensile strength, ksi	Elastic modulus, ksi	Elongation, percent
Fiber-A	63.8	3860	1.65
Fiber-B	83.6	4426	1.89
Fiber-C	93.4	4237	2.22
Fiber-D	96.9	4498	2.17
Fiber-E	98.4	4455	2.19
Fiber-F	99.0	4295	2.33
Fiber-G	106.6	4469	2.38
Fiber-H	110.9	4701	2.36

Metric equivalent: 1ksi = 6.895 MPa.

crete following first crack [4.1, 4.48, 4.49]. Other researchers have demonstrated nylon's ability to provide improved toughness and crack control following exposure to an accelerated aging environment [4.22]. The accelerated environment, a saturated brine solution heated to 122 F (50 C), was used to determine long-term durability. Flexural beams, reinforced with 0.75 in. (19 mm) long nylon fibers at 0.5 percent by volume, were subjected to this environment for specific time intervals up to 360 days.

Conflicting results have been obtained with respect to flexural strength. A number of researchers have shown increased flexural strength [4.1, 4.49-4.51]. Others assert nylon fibers contribute very little to the improvement of flexural strength even at high fiber contents [4.18, 4.48].

The effect of nylon fibers on compressive and splitting tensile strength has been shown to be negligible in several cases [4.49, 4.51]. One researcher concluded that compressive strength of mortar mixes decreases with increasing fiber content. The nylon fiber, a 0.5 in. (13 mm), 15 denier material was added at contents up to 1 percent by volume [4.51]. With respect to splitting tensile strength, the addition of nylon at 2.4 percent by volume was shown not to significantly increase strength. For the purposes of this evaluation, a mortar mix containing high-early strength cement and silica sand was used [4.49].

The effectiveness of low modulus, synthetic fibers to reinforce concrete and enhance its properties is controlled by the fiber/cement interface, fiber geometry, and fiber distribution [4.49]. Property improvements seen with nylon fibers are reported as being primarily a function of fiber geometry (high aspect ratio) and fiber distribution. Low bond strength between a certain type of nylon fiber and the cement matrix has been reported [4.49].

The ability of nylon fiber to reduce concrete shrinkage has been demonstrated in one test series. Nylon fibers added at contents ranging from 1 to 3 percent by volume were shown to decrease shrinkage by as much as 25 percent as measured by length change [4.52].

4.3.5—*Polyester FRC*

Polyester fibers have been used in concrete to control plastic shrinkage-induced cracking [4.49, 4.53, 4.54]. The fiber is added at relatively low fiber contents, approximately 0.1 percent by volume for this purpose, as it is for other synthetic fiber types.

4.3.6—*Polyethylene FRC*

As indicated in Fig. 4.7 concrete reinforced with polyethylene fiber contents ranging from 2 to 4 percent by volume exhibited a linear flexural load deflection behavior up to first crack. This behavior is followed by an apparent transfer of load to the fibers permitting an increase in load until fibers begin to break [4.26]. Multiple cracking is observed to occur.

4.3.7—*Polypropylene FRC*

Test data have been compiled for composites containing polypropylene fibers at volume percentages ranging from 0.1 to 10.0 percent. The material properties of these composites vary greatly and are affected by the fiber volume, fiber geometry, method of production and composition of the matrix. This is true for all synthetic fiber types.

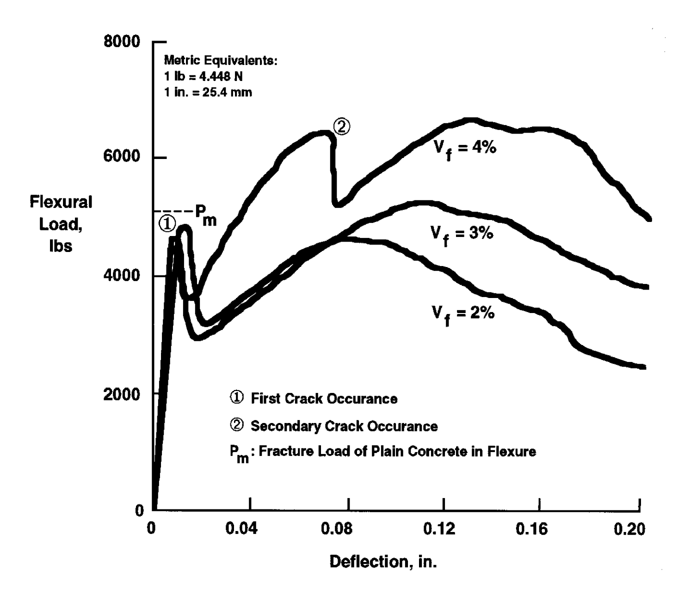


Fig. 4.7—Typical flexural load-deflection curves of polyethylene fiber reinforced concrete for various fiber contents

4.3.7.1 *Fresh concrete properties and workability*—Fresh concrete properties and workability determined by three different methods (slump, inverted slump cone time, and Vebe time) were reported for collated fibrillated polypropylene fiber reinforced concrete having fiber contents ranging from 0.1 to 2.0 percent by volume [4.55-4.59].

Satisfactory workability was maintained even with a relatively high fiber content (2.0 percent by volume) with the addition of an appropriate amount of high-range water reducer to maintain equal strength and water-cement ratio [4.59]. Although fibrillated polypropylene fibers, cement, and aggregates were added to the mixer simultaneously, no balling occurred even at higher quantities of fibers. The fresh concrete with fibrillated polypropylene fibers had no surface bleeding and no segregation [4.55, 4.56, 4.58, 4.59].

4.3.7.2 *Compressive strength*—Compressive strengths have been reported for polypropylene FRC with fiber contents ranging from 0.1 to 2.0 percent by volume [4.14, 4.34, 4.55, 4.56, 4.58-4.61]. There is no consensus in the reported results. In general, it can be stated that the addition of polypropylene fibers at different quantities has no effect on the compressive strength. The minor differences noticed are expected variation in experimental work. They can also be due to variations in the actual air contents of the hardened concrete and the differences in their unit weights.

However, the addition of polypropylene fibers has a significant effect on the mode and mechanism of failure of concrete cylinders in a compression test. The fiber concrete fails in a more ductile mode. This is particularly true for higher strength fiber concretes, whereas plain control concrete cylinders typically shatter due to an inability to absorb the energy release imposed by the test machine at failure. Fiber concrete cylinders continue to sustain load and endure large deformations without shattering into pieces [4.55-4.58].

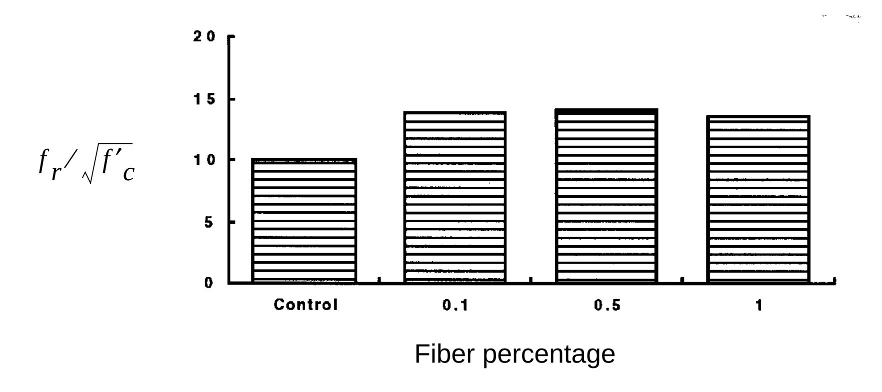


Fig. 4.8—Ratio of modulus of rupture to the square

It was also reported [4.57] that, for a specific concrete mix used for both control concrete and fiber concrete, high quantities of fiber (2.0 percent by volume) produced concrete with poorer workability, more bleeding and segregation, relatively higher entrapped air (13.9 percent), and lower unit weight. This resulted in a decrease in the compressive strength. This observation indicates the importance of adjusting aggregate proportions when high quantities of fibers are used [4.57]. Optimum mixture proportions should be obtained by trial mixes when using higher fiber volumes. This was demonstrated in another investigation by the same author [4.58]. It was shown that there was no reduction in compressive strength when 0.1 to 1.0 percent by volume of fibers were added.

4.3.7.3 *Static modulus and pulse velocity*—When compared on an equal compressive strength basis, it was shown [4.55-4.59] that the addition of fibrillated polypropylene fibers in quantities varying from 0.1 to 2.0 percent by volume had no effect on the static modulus of elasticity as determined using ASTM C 469 test procedure. This was true when the concrete cylinders were tested at both 7 and 28 days.

Beams and cylinders were tested at 7 and 28 days for pulse velocity according to ASTM C 597 for fibrillated polypropylene FRC with fiber contents ranging from 0.1 to 2.0 percent by volume [4.55-4.59]. The results showed that there was little or no effect on the measured pulse velocities due to the addition of fibers to the control concrete indicating that concrete matrix qualities were not compromised by the addition of fibers.

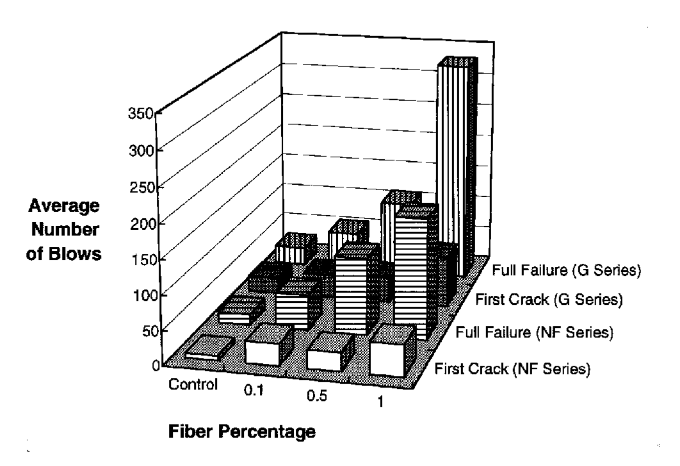


Fig. 4.9—Impact test results for polypropylene FRC

4.3.7.4 *Flexural strength (modulus of rupture)*—Similar to the compressive strength results, there is no consensus in the published literature about the effect of adding polypropylene fibers on the first-crack strength and modulus of rupture. It has been reported [4.34] that at a fibrillated polypropylene fiber content of 0.1 percent by volume, there was a slight increase in flexural strength (0.7 to 2.6 percent), and at 0.2 to 0.3 percent by volume there was a slight decrease. Others [4.56] have reported that the modulus of rupture determined at 7 and 28 days was slightly greater for fibrillated polypropylene FRC at fiber contents of 0.1 to 0.3 percent by volume in comparison to plain concrete.

When the same basic mix proportions were used, the modulus of rupture decreased as the fiber content was increased from 0.1 to 2.0 percent by volume [4.59]. For 2.0 percent by volume fibrillated polypropylene FRC, the compressive strength was low due to the higher air content and, hence, the flexural strength was also low. Similarly, for 1.0 and 1.5 percent fibrillated polypropylene fiber volumes, the compressive strengths were low, and hence, the flexural strengths were also low. As a result, the direct flexural strength comparisons may be misleading [4.59]. Figure 4.8 illustrates the effect of adding varying quantities of fibrillated polypropylene fibers to a basic plain concrete mix. In Fig. 4.8, note that the modulus of rupture, f_r, values were normalized by dividing them by $\sqrt{f'_c}$. It is obvious that the mix proportions should be properly designed when higher quantities of fibers are added in order to obtain suitable workability and strength. In another investigation, the mix proportions were optimized by trial mixes for higher quantities of fibrillated polypropylene fibers [4.58]. When these optimized mix proportions were used, there was no change in compressive strength and no change in modulus of rupture for higher volume percentages of fibrillated polypropylene fibers.

4.3.7.5 *Impact strength*—A large number of test setups has been used to investigate the performance of polypropylene FRC under impact loading. Due to the variable nature of such testing and the need to apply specialized analytical techniques to each test setup, cross test comparisons cannot be made. There are reports of increased impact strength

when using polypropylene fibers [4.1, 4.55, 4.57, 4.62-4.65]. However, in other tests no improvement was found [4.66-4.68]. Impact strength improvement was reported to be as high as 15 percent in uniaxial tension mode [4.64] and 50 percent in a flexural mode [4.63]. Using the ACI "drop-weight" test according to ACI Committee Report 544.2R, the impact strength was measured for polypropylene fiber reinforced concretes with fiber contents ranging from 0.1 to 2.0 percent by volume and the same basic mixture proportions for all the concretes [4.57]. Both impact strength at first crack and at complete failure increased significantly with the addition of polypropylene fiber compared to the plain control concrete. In another investigation [4.55], concretes with two different mixture proportions (water-cement ratio 0.40 for NF Series and 0.5 for G Series) and three different fiber contents (0.1, 0.5, and 1.0 percent by volume) were tested for impact strength using the ACI drop-weight test method. The comparison bar chart for first crack and complete failure shown in Fig. 4.9 shows that, for all fiber contents, the number of blows for first crack and complete failure are considerably greater than that for plain concrete. Also, the impact strength increases as fiber content is increased. Improvement in fracture energy for polypropylene FRC was reported between 33 and 1000 percent [4.63, 4.66].

The effect of polypropylene FRC used with conventionally reinforced beams under impact loading has been reported [4.69]. In addition to the conventional reinforcement both moderate strength and high strength concrete specimens contained 0.5 percent by volume of 1.5 in. (37 mm) long fibrillated polypropylene fibers. The improvement in impact fracture energy was twofold using moderate strength concrete (6000 psi [42 MPa]) and almost ten fold using high strength concrete (12,000 psi [82 MPa]).

4.3.7.6 *Fatigue strength and endurance limit*—One of the important attributes of FRC is the enhancement of fatigue strength compared to plain concrete. Failure strength is defined as the maximum flexural fatigue stress at which the beam can withstand two million cycles of non-reversed fatigue loading. In many applications, particularly in pavements and bridge deck overlays, full depth pavements and industrial floors, and offshore structures, flexural fatigue strength and endurance limit are important design parameters mainly because these structures are subjected to fatigue load cycles. The endurance limit of concrete is defined as the flexural fatigue stress at which the beam could withstand two million cycles of non-reversed fatigue loading, expressed as a percentage of the modulus of rupture of plain concrete.

The flexural fatigue strengths and endurance limits have been reported for polypropylene FRC with various fiber contents [4.4, 4.55-4.59]. Specifically, the addition of polypropylene fibers, even in small amounts, has increased the flexural fatigue strength. Using the same basic mixture proportions, the flexural fatigue strength was determined for three fiber contents (0.1, 0.2, and 0.3 percent by volume) and it was shown that the endurance limit for two million cycles had increased by 15 to 18 percent [4.56]. Another extensive investigation [4.57] was conducted to determine the behavior and performance characteristics of FRC subjected to fatigue loading for four types of fibers including polypropylene fibers. Concretes with two fiber contents (0.5 and 1.0 percent by volume) and using the same basic mixture proportions were tested up to four million cycles. In this study, the endurance limits were not significantly improved. For polypropylene FRC with 0.5 and 1.0 percent fibers by volume, the endurance limits were 67 and 70 percent, respectively. For the plain control concrete, the endurance limit was 65 percent [4.57].

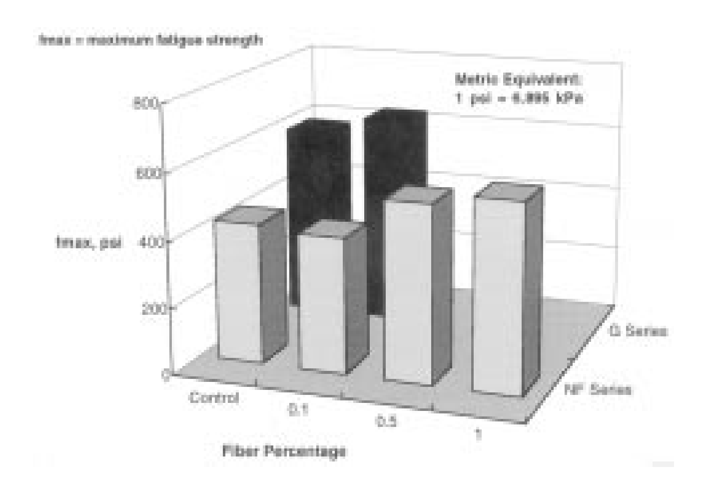


Fig. 4.10—Fatigue strength for polypropylene FRC

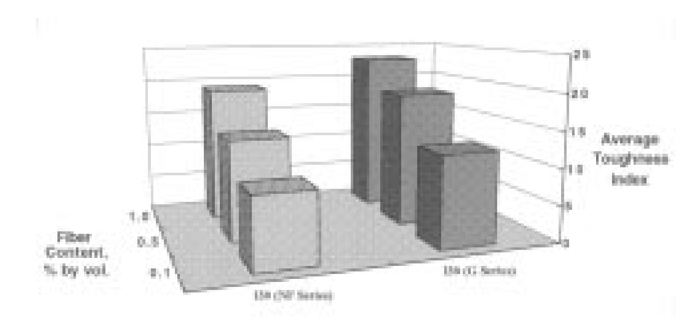


Fig. 4.11—I_{30} toughness indices for polypropylene FRC

In another investigation, using optimized mixture proportions, the flexural fatigue strengths were determined for concretes having fiber contents of 0.1, 0.5, and 1.0 percent by volume [4.58]. The flexural fatigue strengths are shown in Fig. 4.10. As shown in the figure, there is a trend toward increasing fatigue strength as the fiber content is increased. The endurance limits for two million cycles (the ratio of the maximum flexural fatigue strength to the modulus of rupture) increased by 16, 18, and 38 percent for 0.1, 0.5, and 1.0 percent fiber content by volume, respectively, in comparison to plain concrete [4.58].

Similar to steel FRC, polypropylene FRC also shows increased static flexural strengths after being subjected to fatigue loading [4.55]. Thus, it can be stated that for polypropylene FRC subjected to fatigue stress below the endurance limit value, there is an increase in the potential modulus of rupture value.

4.3.7.7 *Flexural toughness and post-crack behavior*—Flexural toughness and post-crack behavior have been reported for fiber contents ranging from 0.1 to 2.0 percent by volume [4.3, 4.4, 4.30, 4.56-4.59, 4.70-4.73]. The toughness

was determined using the ACI method reported in ACI Committee Report 544.2R and ASTM C 1018. Mostly, the earliest reported results were based on the ACI method and the most recent reported results were based on the ASTM method. It should be noted that the toughness index values depended to a large extent on the type of machine and type of loading method employed [4.73]. When load-controlled machines were used, polypropylene FRC with 0.1 percent fibers by volume failed suddenly without any appreciable increase in toughness compared to control concretes [4.56]. This was true for both 7 and 28 day tests. Beams with 0.2 and 0.3 percent by volume of fibers showed considerable increase in toughness. A toughness index (I_5) value between 2 and 3 was obtained. When the tests were conducted according to ASTM C 1018 with deflection-controlled machines or by closed-loop testing machines, even beams with fiber contents of 0.1 percent by volume had toughness index values of 3 or more [4.57]. However, even plain concrete beams (without fibers) gave toughness index values of 3 when tested on closed-loop deformation-controlled machines. The reported toughness index (I_5) values varied from 3.5 to 4.8 for concretes with 0.5 and 1.0 percent fibers by volume. The calculated values for toughness index I_{30}, determined according to ASTM C 1018, are shown in Fig. 4.11 [4.55]. The toughness index depends largely on the estimate of the first-crack load. Therefore, caution should be exercised in interpreting published toughness results.

At higher fiber contents, there is considerable improvement in the I_{30} toughness index for polypropylene FRC as shown in Fig. 4.11.

Factors such as fiber length, fiber material, fiber geometry, and bonding characteristics also influence the toughness and post-crack behavior. It has been reported that, due to the addition of polypropylene fibers at a fiber content of 0.1 percent by volume, there is an improvement in the post-crack behavior and energy absorbing capacity of concrete [4.57, 4.63]. Beams reinforced with polypropylene fibers can sustain loads beyond the first crack-load, but at a reduced load level. The ability to absorb elastic and plastic strain energy and to conduct tensile stresses across cracks is an important performance factor for serviceability. These factors provide a mechanism for controlling the growth of cracks after crack opening deformations have occurred. The fiber content has an influence on the post-crack load carrying capacity. Tests [4.55] have shown that the post-crack reduction in load expressed as a percentage of maximum load were 45, 27, and 26 percent for beams with 0.1, 0.5, and 1.0 percent fiber by volume, respectively. The post-crack reduction in load generally decreases as the fiber content increases, as shown in Fig. 4.12 [4.55].

Researchers [4.70] have also shown that composites reinforced with collated fibrillated polypropylene fibers displayed excellent post first-cracking behavior if produced under certain optimized conditions. Mechanical bonding properties of the polypropylene fiber were found to be greater for twisted collated fibrillated polypropylene fibers or for fibers with buttons (enlargements) added to the fiber ends. It was also determined that premixing the fibers to achieve a 3-dimensional random fiber distribution resulted in stronger and tougher composites than alternatively preplacing the fibers in a 3-dimensional mat. A representative flexural load-deflection curve for the collated fibrillated polypropylene fiber reinforced concrete composite described above is shown

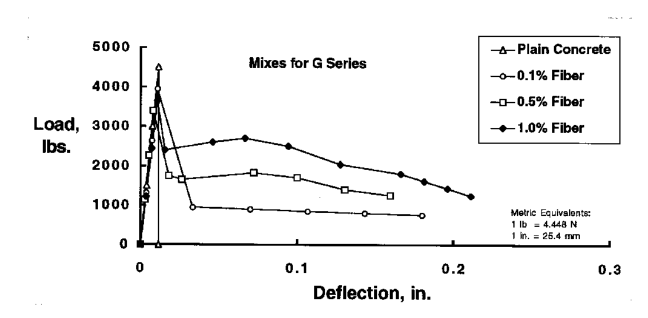


Fig. 4.12—Load-deflection comparison curves for polypropylene FRC

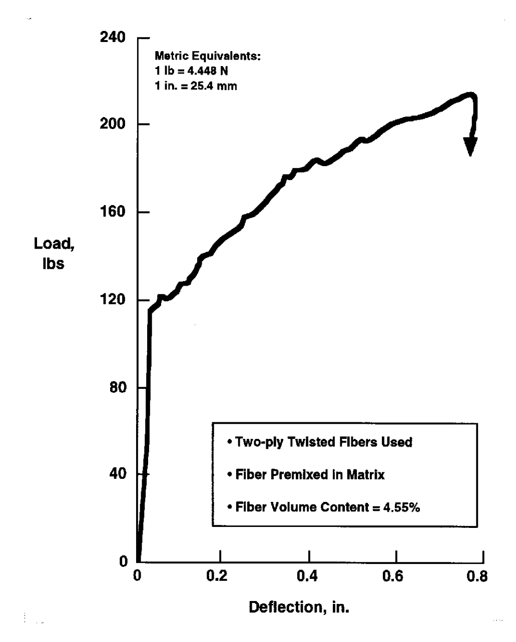


Fig. 4.13—Representative load-deflection curve for optimized composite containing chopped polypropylene fiber

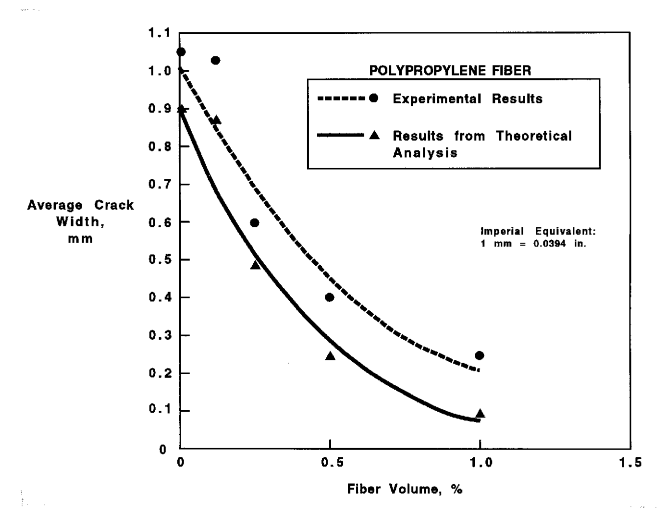


Fig. 4.14—Average crack width versus fiber volume content

in Fig. 4.13. Multiple matrix cracking was associated with the post-cracking behavior of the composite.

Another testing program [4.30] showed that composites reinforced with polypropylene fibers can sustain loads beyond the first cracking load. Research was conducted using composites reinforced with either monofilament or fibrillated fibers. Tests were conducted to determine the effects of fiber content as well as several other variables on the mechanical properties of composites. Increases in fiber content resulted in decreases in the first cracking strength and increases in the ultimate strength of composites in flexure.

Considerable shotcrete research, both in the laboratory and in the field, has been conducted with collated fibrillated polypropylene fibers at contents ranging from 0.4 to 0.7 percent by volume [4.3, 4.74-4.76]. Collated fibrillated polypropylene fibers are being used to replace conventional reinforcement materials in tunnel lining and slope stabilization applications.

Research comparing post-crack properties of fibrillated polypropylene fiber, steel fiber, and welded-wire fabric (WWF) reinforced shotcrete show the fibrillated polypropylene fiber at 0.6 percent by volume to have load carrying properties similar to approximately 100 lb/yd^3 (59 kg/m^3) of steel fiber and 4 x 4 - W2.1 x W2.1 and 6 x 6 - W2.9 x W2.9 [4.3].

4.3.7.8 *Shrinkage and cracking*—Rectangular and square slab specimens have been used to demonstrate the ability of SNFRC at low volume fiber additions to control cracking resulting from volume changes due to plastic and drying shrinkage. Several reports [4.38-4.41] have shown that low denier fiber, and therefore high fiber count (number of fibers per unit volume), reduces the effects of restrained shrinkage cracking.

One report [4.77] shows the ability of polypropylene FRC to control drying shrinkage cracking. The tests were conducted using ring type specimens to simulate restrained shrinkage cracking. With the dimension of these specimens, it can be assumed that the concrete ring is subjected to approximately uniaxial tensile stresses, when the shrinkage of the concrete annulus is restrained by the steel ring. Then the crack width is measured using a special microscope. Concretes made with different amounts of polypropylene fiber were studied. Results are shown in Fig. 4.14. It can be seen that the addition of polypropylene fiber reduced the average crack width significantly (compared to plain concrete). A theoretical mathematical model to predict crack width of ring specimens subjected to drying was also developed.

There is presently no standardized procedure for quantifying the effects of polypropylene, or any other synthetic fiber, on plastic or drying shrinkage or on cracking that results from volume changes under restrained conditions. However, many procedures have been suggested and their results are being studied by the ASTM Subcommittee C09.42 Task Group on shrinkage testing.

Reductions in drying shrinkage (or volume change) in unrestrained specimens have been reported using polypropylene fibers at 0.1 percent by volume [4.35]. Unrestrained drying shrinkage tests conducted at an early age and using accelerated drying conditions [4.35] indicated reductions of 18, 59, and 10 percent for fiber volumes of 0.1, 0.2, and 0.3 percent, respectively. Due to the high degree of variability associated with such testing, the authors caution against using these data to form the relationship between fiber amount and shrinkage reduction. Test specimens were cured under water, then subjected to accelerated drying. Shrinkage strain versus time was plotted to compare specimens containing fibers with control specimens treated identically and simultaneously. These curves are shown in Fig. 4.15.

These same authors [4.35] also reported plastic shrinkage reductions of 12 to 25 percent for polypropylene contents ranging from 0.1 to 0.3 percent by volume. Plastic shrinkage tests followed ASTM C 827. During the tests, it was noted that the quantity of surface bleed water was significantly reduced by the addition of fibers. It was suggested that the presence of fibers reduced settlement of the aggregate particles, thus eliminating damaging capillary bleed channels and preventing an increase in inter-granular pressures in the plastic concrete. This reduced settlement helps account for the

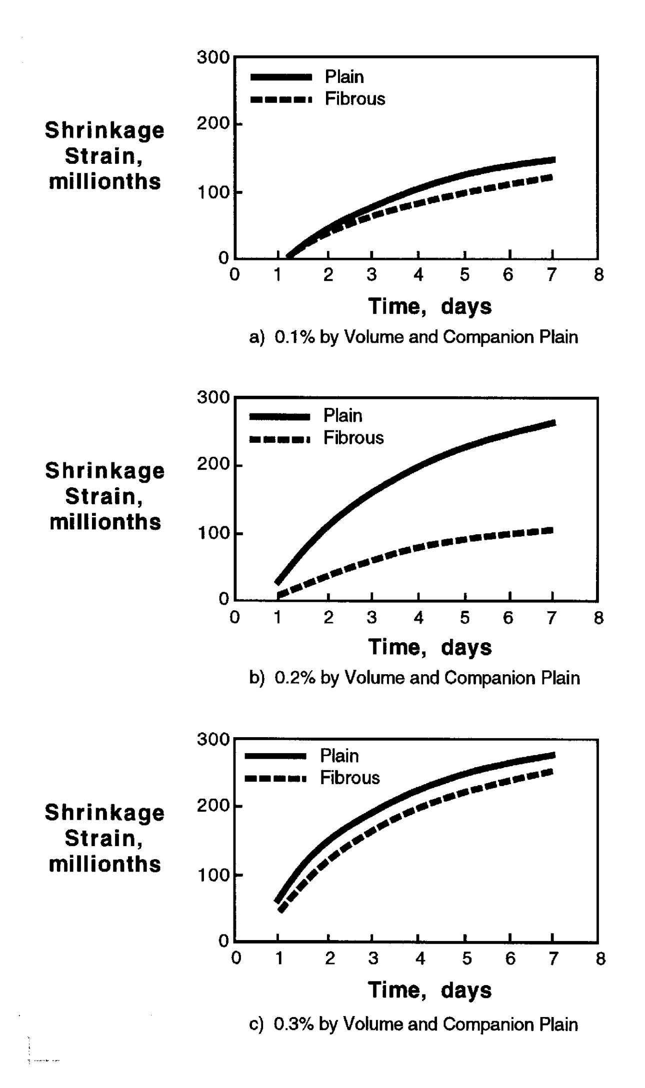


Fig. 4.15—Drying shrinkage strain versus time plots for polypropylene fiber reinforced concrete sptcimens and companion plain concrete specimens

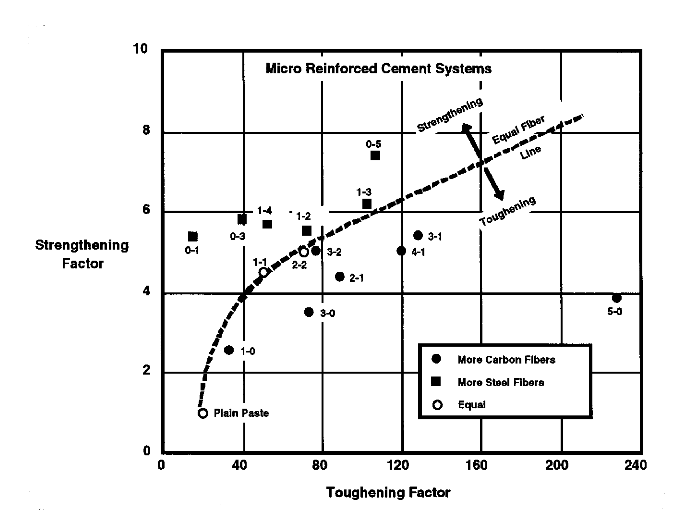


Fig. 4.16—Carbon-steel hybrid fiber reinforced concrete

greater volume (lower density) with fibrous mixes discussed earlier.

Although unrestrained shrinkage tests do provide some information about the shrinkage characteristics of fiber reinforced composites, results of these tests may not provide any useful information regarding how composites respond to shrinkage-induced stresses in a restrained condition. In the restrained condition, shrinkage strains translate into tensile stresses in concrete. After cracking, polypropylene fibers are believed to transfer tensile stress across cracks and act to arrest or confine crack tip extension so that many fine (hairline) cracks occur instead of fewer larger cracks [4.78].

Other research has shown that low volume contents, 0.1 percent, of low effective diameter polypropylene fiber significantly limit crack size for plastic shrinkage cracks that occur within the first few hours after casting [4.40, 4.41].

Composites reinforced with higher volume contents of polypropylene fiber have also been shown to have an influence on restrained shrinkage and shrinkage induced cracking [4.71]. Composites reinforced with 2 percent polypropylene fibers by volume can provide significant post-cracking toughness effectively distributing shrinkage induced cracking in mature concrete.

Multiple cracking displayed by hardened composites during restrained shrinkage tests indicates the ability of the fiber concrete to distribute shrinkage induced cracking strains.

4.3.7.9 *Bond strength*—Generally speaking, the effectiveness of polypropylene fibers in fiber reinforced concrete depends upon the mechanical bond between the fiber and cement paste. Polypropylene is chemically inert and hydrophobic, thus eliminating the potential for chemical bonding. As a result, the mechanical bond of fibrillated polypropylene fibers can be greater than monofilament polypropylene fibers [4.14]. The fibrillated polypropylene fiber exhibits improved mechanical bonding as a direct result of cement matrix penetrating the fibrillated network that anchors the network in the matrix [4.14]. This feature is called pegging. A mechanical bond or adhesion with calcium silicate hydrate has been reported [4.31].

4.3.7.10 *Tests at elevated temperatures*—It has been shown that polypropylene fiber reinforced concrete may not be compatible with certain autoclave curing techniques [4.32]. Results of tests indicate that composites cured in an autoclave at 58 psi (0.4 MPa), 284 F (140 C) for 24 hours and then oven-dried at 241 F (116 C) for 24 hours suffer a considerable loss in ductility due to thermal oxidative degradation of the polypropylene fibers. It was later proven that the thermal degradation was caused by the high oven-drying temperature employed and that autoclave curing in conjunction with oven-drying could be used only if drying temperatures are greatly reduced.

Full scale fire testing of metal deck composite slabs, utilizing fibrillated polypropylene fibers and no other reinforcement, has been reported [4.79, 4.80]. Test results indicated that the presence of fibers had no adverse effect and that a two-hour fire rating could be achieved for unprotected steel deck composite slab system and a three-hour fire rating could be achieved for a protected steel deck composite slab system.

4.3.8—*Hybrid fiber reinforced concrete*

Although not investigated extensively, the use of two or more fiber types in the same concrete mix is considered promising. The decision to mix two fibers may be based on the properties that they may individually provide or simply based on economics. Considerable improvement in the load-deflection response was observed mixing steel with polypropylene fibers [4.81].

In a more recent study [4.82], steel micro-fibers (25 microns in diameter and 3 mm long) and carbon micro-fibers (18 microns in diameter and 6 mm long) both in mono- and hybrid- forms were investigated. In the mono-form, steel fiber provided better strengthening than the carbon fiber and carbon fiber provided better toughening than the steel fiber. Interestingly, in the hybrid form (in combination), they both retained their individual capacities to strengthen and toughen as shown in Fig. 4.16. It appears possible, therefore, that by properly controlling fiber properties and combining them in appropriate proportions, one can actually tailor-make hybrid fiber composites for specifically designed applications.

4.4—Composite production technologies

Batch mixing is a widely used production method for all types of SNFRC. Fibers are added to the wet mix directly from bags, boxes, or feeders. Collated fiber types require mechanical agitation during the mixing process to encourage the breakup of fiber bundles and their dispersion through the mixture. Prepackaged dry mixes that contain dispersed fibers and to which only water need be added are also available. Preweighed fiber quantities in degradable bags are also widely used to facilitate batching.

After batching, placement techniques include all the standard methods such as batch casting, pumping, wet-mix shotcreting, and plastering. The use of dry-mix shotcrete for SNFRC is difficult due to the propensity for the relatively low density fibers, specific gravity of approximately 1.0, to be blown out either by the shotcrete nozzle air pressure

stream or by environmental air streams. Slip form machines pose no problems with SNFRC mixes.

Polypropylene fibers have been incorporated into concrete using several methods [4.18, 4.30, 4.63, 4.83]. They may be mixed as short discrete fibers of monofilament or fibrillated form. It has been reported that polyethylene fibers could be easily dispersed in concrete matrices in volume percentages of up to 3 percent using conventional mixing techniques [4.26].

Acrylic fibers have been used in the Hatschek process, which is used to manufacture asbestos-cement board.

Asbestos fiber conforms very well to the Hatschek process because these finely fibrillated fibers provide excellent filtration characteristics that keep the cement particles uniformly dispersed in the fiber/cement slurry and prevent segregation during vacuum dewatering. Acrylic fibers cannot perform this function due to their relatively large diameter and specific surface properties. Therefore, it is necessary that certain "process" fibers be used as filler in addition to acrylic reinforcing fibers to provide filtering characteristics and prevent segregation of fine particles. Generally, acrylic fiber is incorporated at 1 to 3 percent by weight while process fibers are added at 3 to 6 percent by weight. Some examples of effective process fibers are kraft cellulose pulp fiber and polyethylene pulp fiber [4.5, 4.42].

Concrete panels with monofilament polypropylene fiber have been produced using a spray suction dewatering technique [4.18]. Monofilament fibers also have been used in a pressing technique [4.30].

With the hand lay-up technique, higher fiber volume percentages (up to 12 percent) can be obtained than with conventional batch mixing techniques (up to about 1 percent). Spray suction dewatering techniques can produce composites with as high as 11 percent fiber by volume.

Consistency is commonly measured by the slump test, ASTM C 143. An apparent slump difference should be expected when comparing non-fibrous and SNFRC for otherwise similar mix designs. In the case of hydrophobic fibers, there is no loss of water to the fiber, but the fiber will provide a plastic shear strength to the mix that will reduce slump.

Conventional ready-mixed concrete can easily be produced using monofilament or fibrillated fibers at 0.1 percent volume with little loss of consistency as measured by slump. However, slump loss will increase more rapidly beyond this point [4.14, 4.60]. The slump loss is dependent upon the fiber length as well. Slump is often, though improperly, used as a measure of workability, and it is often said that the workability of concrete is reduced in the presence of fibers. However, with standard placement practices, fiber concrete will work, place, and pump readily. No additional mixing water is required and none should be added. Since the conventional slump test is an inappropriate measure of workability for FRC, it is recommended that the inverted slump cone test (ASTM C 995) or the Vebe Test (ACI 211.3) be used to evaluate workability.

Synthetic fibers are usually added to ready-mix concrete at the batch plant [4.14]. Conventional placement methods are applicable, including batch placement and pumping.

4.5—Fiber parameters

In current commercial and industrial bulk concrete applications, synthetic fibers are added to concrete in the low range of fiber additions, approximately 0.1 percent based on the volume of concrete. In these applications, the strength of the concrete is considered to be unaffected and crack control characteristics are sought.

Fiber additions of two or three times the volume above are being tested and flexural strength and toughness increases are being reported when concrete placement can be accomplished without compaction difficulties.

Size and weight classification of fibers used in these applications use terminology originating in the textile industry. One example is the use of the term "denier." Denier is defined as the weight in grams of 9000 meters of fiber. When determining the denier of a fiber, a single filament is used. For a fibrillated tape, a standard width of the extruded film is used. The fiber denier is thus a measure of the fineness of the fiber. When applied to concrete mixtures, there may be differences between the fiber denier as it exists prior to batching (pre-mix fiber denier) and as it exists after mixing (post-mix fiber denier), since some fiber types are designed as collated fiber bundles that separate during the mixing process. Furthermore, the fibrillation pattern of an extruded sheet of polypropylene can vary from manufacturer to manufacturer. Thus, the denier of the main fibrils and cross fibrils may be considerably different within the fibrillated network and from product to product.

Denier is a measure of fiber fineness and may be correlated to an equivalent fiber diameter or an equivalent fiber cross-sectional area. Figure 4.17 is a plot of the relationship between the fiber type, as defined by denier and specific gravity, and the equivalent fiber diameter in either inches or millimeters [4.84]. Specifying the fiber denier alone is not enough, as the parent material, or the specific gravity, must also be known to obtain an average fiber geometry.

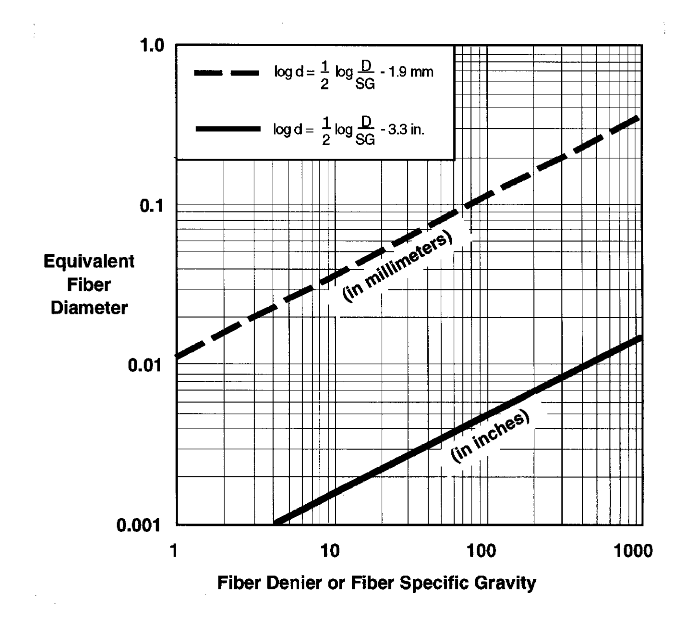


Fig. 4.17—Fiber diameter versus denier relationship

To determine the equivalent fiber diameter, *d*, before or after mixing, for a fiber of known specific gravity apply the following equation:

$$d = f\left[\frac{D}{SG}\right]^{1/2}$$

where:

f = .0120 for d in mm
f = 0.0005 for d in inches
D = pre-mix or post-mix fiber denier
SG = fiber specific gravity

where SG is the specific gravity of the fiber material and D can be either the before-mix denier or the post-mix denier as desired. With these equations, synthetic fibers can be compared with other fiber types by their aspect ratio, L/d, where L is the length of fiber and d is the equivalent fiber diameter.

For example, synthetic fibers of polypropylene with a specific gravity of 0.91 and which are comparable in size to steel fibers, approximately 0.01 inches (0.025 mm) in diameter, are approximately 360 denier. The denier of the same size fibers of steel would be approximately 3100. These are the type and size of synthetic fibers, 360 denier, which were first applied in synthetic fiber concrete production. Monofilament, multifilament, or fibrillated synthetic fibers are currently applied at far lower denier, down to 5 to 50. For these fibers, the equivalent diameter is only 0.001 inches (0.025 mm) and therefore the aspect ratio is increased by ten times for equal length fibers.

The following series of equations and tables is helpful [4.84]. They provide the relationship between various geometric and material type fiber parameters.

4.5.1—*Fiber spacing and surface area*

Fiber spacing and specific surface are key parameters influencing the behavior of fiber reinforced concrete both in the plastic stage and in the hardened final product.

The average fiber spacing is a function of fiber cross-sectional area, fiber volume, and fiber orientation. The average fiber spacing is derived from the number of fibers crossing a unit area in an arbitrary composite cross section. It affects both the rheological properties of the mix and, to a certain extent, the mechanical properties of the hardened concrete. When mixing and casting FRC, the deformation and flow characteristics depend on fiber spacing. More energy is required to distribute concrete throughout numerous narrow fiber spaces than throughout a few large spaces. The ability of fibers to act as crack arrestors is influenced in part by the distance a crack can travel before it intercepts a fiber.

The fiber specific surface (FSS) is the predominant factor determining crack spacing and crack width. The greater the specific fiber surface, the closer the crack spacing and the narrower the crack width. The FSS is a function of the single fiber surface area and the number of fibers in a unit volume of concrete, i.e., the fiber count.

For any given volume percentage of fibers of equal length that can ideally be assumed uniformly distributed in a concrete mix the number of individual fibers per unit volume of concrete varies inversely with the square of the individual fiber diameter. Put more simply, the number of fibers which theoretically occupy and are distributed in a unit volume of concrete matrix, termed the fiber count (FC), can be determined from the relationship [4.84]:

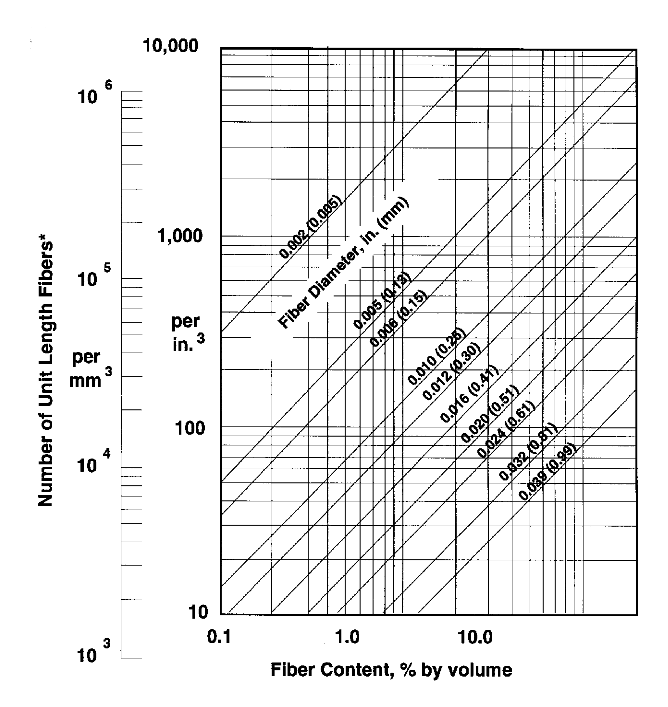


Fig. 4.18—Fiber count or specific surface as a function of fiber volume and geometry

$$FC = \left[\frac{0.0127(V)}{L(d^2)}\right]$$

or in terms of fiber denier,

$$FC = \left[\frac{50.8(V)(SG)(10^3)}{L(P_0MD)}\right]$$

where:

V = fiber content, percent by volume,
L = fiber length, in.,
d = equivalent fiber diameter, in., and
P_0MD = post-mix fiber denier, i.e., after dispersion of bundled or collated fiber.

To determine how many more (or fewer) fibers of different equivalent diameter will occupy a unit volume of concrete matrix it can be shown that the fiber count, *FC*, varies inversely as the square of the fiber diameter as:

$$FC_1 = (d_2/d_1)^2 FC_2$$

where:

FC_1 and FC_2 = fiber count (no. of fibers/ unit volume) for fiber types 1 and 2, respectively.
d_1 and d_2 = equivalent fiber diameter for fiber types 1 and 2, respectively.

Similarly, using the definition of specific surface as the total surface area of fibers per unit volume of matrix, it is shown below that the specific surface of fibers of unit length and constant volume percentage varies inversely with the fiber diameter:

$$FSS_1 = (d_2/d_1)FSS_2$$

where:

FSS_1 and FSS_2 = fiber specific surface for fiber types 1 and 2, respectively.

d_1 and d_2 = equivalent fiber diameter for fiber types 1 and 2, respectively.

Similar expressions have been derived for fiber count (*FC*) or fiber specific surface (*FSS*) as a function of weight dosage rate, volume, specific gravity, denier, and diameter [4.84] as shown below:

$$FC = \left[\frac{7.5(DRT)(10^{-4})}{L(d^2)(SG)}\right] = \left[\frac{0.0127(V)}{L(d^2)}\right] = \left[\frac{3.0(DRT)(10^3)}{L(P_0MD)}\right] = \left[\frac{50.8(V)(SG)(10^3)}{L(P_0MD)}\right]$$

$$FSS = \left[\frac{2.36(DRT)(10^{-3})}{d(SG)}\right] = \left[\frac{0.04(V)}{d}\right] = \left[\frac{4.71(DRT)}{[(P_0MD)(SG)]^{1/2}}\right] = \left[\frac{80(V)(SG)^{1/2}}{(P_0MD)^{1/2}}\right]$$

where:

FC = fiber count, fibers/in.^{3} (divide FC by 16,390 for mm^3 basis)

FSS = fiber specific surface, surface area/in.^{3} (divide FSS by 16,390 for mm^3 basis)

DRT = dosage rate of fiber, lbs/yd^3

V = fiber content, percent by volume

L = fiber length, in.

d = equivalent fiber diameter, in.

P_0MD = post-mix denier

4.5.2—*Graphical solution*

Figure 4.18 is a nomograph [4.84] that gives the fiber count, *FC*, or the fiber specific surface, *FSS*, of unit length fibers as a function of fiber volume and equivalent diameter.

For example, if a specified volume percentage of fibers is entered along the base of the graph, the abscissa, and a specified equivalent fiber diameter in inches is chosen on the diagonal lines on the graph, then the vertical axis, the ordinate of the graph, gives the fiber count on a unit volume basis. In this procedure, as in previous equations, it is assumed that fibers have a cylindrical shape and circular cross section. Fiber count and specific surface for lengths of fiber of other than unit length, one inch (25 mm), can be found by dividing the values found on the ordinate of the graph by the actual fiber length in the appropriate units.

4.6—Applications of SNFRC

Commercial use of SNFRC currently exists worldwide, primarily in applications of cast-in-place concrete (such as slabs-on-grade, pavements, and tunnel linings) and factory manufactured products (such as cladding panels, siding, shingles, and vaults) [4.85]. Currently, there are two different synthetic fiber volume contents used in applications today. They are 0.1 to 0.3 percent, which is referred to as low-volume percentage, and 0.4 to 0.8 percent, which is referred to as high-volume percentage. There are also two different physical fiber forms. They are monofilament and fibers produced from fibrillated tape. Most synthetic fiber applications are at the 0.1 percent by volume level to control plastic shrinkage cracking. Uses include precast products, shotcrete, and cast-in-place elements. Typically, the fiber length is $^3/_4$ to $2^1/_2$ in. (19 to 64 mm) with the predominance of demand for $^3/_4$ or $1^1/_2$ in. (19 or 38 mm) long fibers.

4.6.1—*Applications of carbon FRC*

Due to the current high cost of the carbon fiber, its application has been limited. Suggested applications for carbon fiber reinforced concrete [4.86] include: corrugated units for floor construction, single and double curvature membrane structures, boat hulls, and scaffold boards. The use of carbon fiber in combination with other fiber types has been discussed as a means of reducing the overall cost.

Carbon FRC has been successfully used in construction of free access floor systems used in computer rooms and office automation system rooms [4.14]. Lightweight carbon FRC with microballoons as aggregate has been applied in the construction of the Al Shaheed Monument in Iraq [4.10]. Carbon FRC curtain walls have been installed in the construction of a 37 story office building in Tokyo, Japan, reportedly resulting in substantial savings in both time and money [4.44].

Proponents of carbon FRC suggest that reduction in the minimum dimensions of pipes and boards can be obtained with the use of carbon fibers. Ignoring economics, structural applications appear promising. Optimization of manufacturing processes for carbon fibers may bring costs down.

4.6.2—*Applications of polypropylene and nylon FRC*

To date, most commercial applications of polypropylene FRC [4.85, 4.88] and nylon FRC have used low denier, low volume percentage (0.1 percent), monofilament (in the case of polypropylene and nylon) or fibrillated fibers (in the case of polypropylene). These fibers have been applied to non-structural and non-primary load bearing applications.

Current applications include residential, commercial, and industrial slabs on grade, slabs for composite metal deck construction, floor overlays, shotcrete for slope stabilization and pool construction, precast units, slip form curbs, and mortar applications involving sprayed and plastered portland cement stucco.

4.7—Research needs

In addition to the ongoing pursuit of the goal of developing cost effective fibers with material properties and fiber geometries that are best suited to particular applications or FRC fabrication technologies, there is a need for further research in the following areas:

1. Determine the effect of the addition of various fiber types on control joint spacing for concrete flatwork.

2. Continue to determine effectiveness of fibers as temperature and shrinkage reinforcement.

3. Develop standardized test procedures for impact and fatigue loading to demonstrate performance differences among various fiber types.

4. Develop composite applications and design parameters using conventional reinforcement in FRC concrete for structural applications.

5. Determine the fire resistant properties of fiber reinforced composites.

4.8—Cited references

4.1 Goldfein, S., "Fibrous Reinforcement for Portland Cement," *Modern Plastics*, Vol. 42, No. 8, 1965, pp. 156-160.

4.2 Williamson, G. R., "Response of Fibrous Reinforced Concrete to Explosive Loading," *Technical Report* No. 2-48, Department of the Army, Ohio River Division Laboratory, U. S. Corp of Engineers, Cincinnati, Ohio, Jan. 1966.

4.3 Morgan, D. R.; McAskill, N.; Richardson, B. W.; and Zellers, R. C., "A Comparative Evaluation of Plain, Polypropylene Fiber, Steel Fiber, and Wire Mesh Reinforced Shotcrete," Transportation Research Board, Washington D. C., Jan. 1989.

4.4 Ramakrishnan, V., and Bjorn, J. L., "Fatigue Strength and Endurance Limit of Plain and Fiber Reinforced Composites—A Critical Review," *Proceedings* of the International Symposium on Fatigue and Fracture in Steel and Concrete Structures, Madras, India, Dec. 1991, pp. 381-405.

4.5 Daniel, J. I., and Anderson, E. D., "Acrylic Fiber Reinforced Cement Composites," *Third International Symposium on Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete,* RILEM Symposium FRC 86, Vol. 1, RILEM Technical Committee 49-TFR, July 1986.

4.6 Hahn, H.; Karl, S.; and Worner, J. D., *Properties of Polyacrylonitrile Fiber Reinforced Concrete*, SP-105, Session on Fiber Reinforced Concrete, Baltimore, Nov. 1986, 13 pp.

4.7 Walton, P. L., and Majumdar, A. J., "Properties of Cement Composite Reinforced with Kevlar Fibres," *Journal of Materials Science*, Vol. 13, 1978, pp. 1075-1083.

4.8 Gale, D. M.; Riewald, P. G.; and Champion, A. R., "Cement Reinforcement with Man-Made Fibers," *International Man-Made Fibres Congress,* E. I. Du Pont de Nemours and Co., Dornbirn, Austria, Sept. 1986.

4.9 Konczalski, P., and Piekarski, K., "Tensile Properties of Portland Cement Reinforced with Kevlar Fibers," *Journal of Reinforced Plastics and Composites,* Vol. 1, Oct. 1982, pp. 378-384.

4.10 Akihama, S.; Suenage, T.; and Banno, T., "Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced Cement Composite and the Application of Large Domes," Kajima Institute of Construction Technology, Kajima Corporation, Tokyo, Japan, July 1984.

4.11 Ali, M. A.; Majumdar, A. J.; and Rayment, D. L., "Carbon-Fibre Reinforcement of Cement," *Cement and Concrete Research,* Vol. 2, 1972, pp. 201-212.

4.12 Aveston, J.; Mercer, R. A.; and Sillwood, J. M., "Fibre-Reinforced Cements—Scientific Foundations for Specifications: Composites—Standards Testing and Design," *National Physical Laboratory Conference Proceedings,* Apr. 1974, pp. 93-103.

4.13 Biggs, A.; Bowen, D. H.; and Kollek, J., *Proceedings of the 2nd International Carbon Fibre Conference*, the Plastics Institute, London, 1974.

4.14 Hannant, D. J., *Fibre Cements and Fibre Concretes*, John Wiley and Sons, Ltd., New York, 1978, 213 pp.

4.15 Nishioka, K.; Yamakawa, S.; and Shirakawa, K., "Properties and Applications of Carbon Fiber Reinforced Cement Composites," *Proceedings* of the Third International Symposium on Developments in Fiber Reinforced Cement and Concrete, RILEM Symposium FRC 86, Vol. 1, RILEM Technical Committee 49-TFR, July 1986.

4.16 Waller, J. A., "Carbon Fibre Cement Composites," *Civil Engineering and Public Works Review,* Apr. 1972, pp. 357-361.

4.17 Waller, J. A., *Carbon Fibre Cement Composites,* SP-44, American Concrete Institute, Detroit, 1974, pp. 143-161.

4.18 Walton, P. L., and Majumdar, A. J., "Cement Based Composites with Mixtures of Different Types of Fibres," *Composites*, Sept. 1975, pp. 209-216.

4.19 *The Condensed Chemical Dictionary,* Van Nostrand, Rheinhold Company, New York, 8th ed., p. 635.

4.20 Cook, J. G., *Handbook of Textile Fibers*, Morrow Publishing Company, Ltd., Durham, England, 1984, pp. 261-283.

4.21 Moncrieff, R. W., *Man-Made Fibers,* John Wiley & Sons, Inc., New York, 1959, pp. 324-333.

4.22 Khajuria, A.; Bohra, K.; and Balaguru, P. N., *Long-Term Durability of Synthetic Fibers*, SP-126, American Concrete Institute, Detroit, 1991, pp. 851-868.

4.23 Sorenson, W. R., and Campbell, T. W., *Preparative Methods of Polymer Chemistry,* Interscience Publishers, Inc., New York, 1961.

4.24 Golding, *Polymers and Resins*, D. Van Nostrand Co., 1959, pp. 288-289.

4.25 Kobayashi, K., "Development of Fibre Reinforced Concrete in Japan," *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 5, No. 1, Construction Press, Feb. 1983.

4.26 Kobayashi, K. and Cho, R., "Flexural Behavior of Polyethylene Fibre Reinforced Concrete," *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete,* Vol. 3, No. 1, Construction Press, Feb. 1981.

4.27 Gale, D. M., and Shin, H., "Cement Matrix Composites and Method for Making Same," U.S. Patent 4,608,089, Aug. 26, 1986.

4.28 Gale, D. M.; Shah, A. H.; and Balaguru, P. N., *Oriented Polyethylene Fibrous Pulp Reinforced Cement Composites*, SP-124, American Concrete Institute, Detroit, 1990, pp. 61-70.

4.29 Gale, D. M.; Guckert, J. R.; and Shelburne, S. S., "Oriented Polyethylene Pulp for Asbestos Replacement in Cement Building Products," Textile Composites in Building Construction—Part I, *Cement-Based Composites and Geotextiles*, FITAT, Lyon, France, July 1990, pp. 47-56.

4.30 Dave, N. J., and Ellis, D. G., "Polypropylene Fibre Reinforced Cement," *The International Journal of Cement Composites*, Vol. 1, No. 1, May 1978, pp. 19-28.

4.31 Rice, E., Vondran, G. and Kunbargi, H., "Bonding of Fibrillated Polypropylene Fibers to Cementitious Materials," *Materials Research Society Proceedings*, Pittsburgh, Vol. 114, 1988, pp. 145-152.

4.32 Mai, Y. W.; Andonian, R.; and Cotterell, B., "Thermal Degradation of Polypropylene Fibers in Cement Composites," *International Journal of Composites,* Vol. 3, No. 3, Aug. 1980, pp. 149-155.

4.33 "Standard Specification for Fiber Reinforced Concrete and Shotcrete," *ASTM Standards for Concrete and Aggregates*, Vol. 04.02, ASTM C 1116, 1989.

4.34 Zollo, R. F., *Collated Fibrillated Polypropylene Fibers in FRC*, SP-81, American Concrete Institute, Detroit, 1984, pp. 397-409.

4.35 Zollo, R. F.; Ilter, J. A.; and Bouchacourt, G. B., "Plastic and Drying Shrinkage in Concrete Containing Collated Fibrillated Polypropylene Fibre," *Third International Symposium on Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete,* RILEM Symposium FRC 86, Vol. 1, RILEM Technical Committee 49-TFR, July 1986.

4.36 "Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete," *ASTM Standards for Concrete and Mineral Aggregates*, Vol. 04.02, ASTM C 1018.

4.37 "Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete," ACI JOURNAL, ACI Committee Report 544.2R 78, July 1978.

4.38 Dahl, A., "Plastic Shrinkage and Cracking Tendency of Mortar and Concrete Containing Fibermesh," FCB Cement and Concrete Research Institute, Trondhein, Norway, *Report* ISBN No: 82-595-4060-6 Nov. 9, 1985, pp. 1-23.

4.39 Kraai, P., "A Proposed Test to Determine the Cracking Potential Due to Drying Shrinkage of Concrete," *Concrete Construction Publications,* Addison, Sept. 1985, pp. 775-778.

4.40 Vondran, G., and Webster, T., *The Relationship of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete to Permeability*, SP 108, American Concrete Institute, Detroit, 1988, pp. 85-97.

4.41 Padron, I., and Zollo, R. F., "Effect of Synthetic Fibers on Volume Stability and Cracking of Portland Cement Concrete and Mortar," *ACI Materials Journal*, Vol. 87, No. 4, July-Aug. 1990, pp. 327-332.

4.42 Daniel, J. I., and Shah, S. P., "Thin Precast Fiber Reinforced Cement Panels," *Materials and Membrane Behavior,* Proceedings of the Sessions at Structures Congress, '87, Structural Division of the American Society of Civil Engineers, Aug. 17-20, 1987.

4.43 Nanni, A., "Properties of Aramid Fiber Reinforced Concrete and SIFCON," *J. of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 2, No. 1, Feb. 1992, pp. 1-15.

4.44 "Carbon-Fiber Reinforced Concrete Curtain Walls," *Concrete Construction*, Jan. 1986, p. 49.

4.45 Banthia, N., and Ohama, Y., "Dynamic Tensile Fracture of Carbon Fiber Reinforced Cements," *Proc., Int'l Conf. on Recent Developments in FRC*, Cardiff, Sept. 1989, pp. 251-260.

4.46 Ohama, Y.; Amano, M.; and Endo, M., "Properties of Carbon Fiber Reinforced Cement with Silica Fume," *Concrete International*, Vol. 7, No. 3, 1985, pp. 58-62.

4.47 Sridhara, S.; Kumar, S.; and Sinare, M. A., "Fiber Reinforced Concrete," *Indian Concrete Journal*, Oct. 1971, pp. 428-442.

4.48 Paramasivan, P.; Nathan, G.; Wong, K.; and Liu, P., "Study of Fiber Reinforced Concrete," First Australian Conference on Engineering Materials, The University of New South Wales, 1974, pp. 333-350.

4.49 Wang, Y., and Backer, S., “An Experimental Study of Synthetic Fiber Reinforced Cementitious Composites,” *Journal of Materials Science*, (Accepted for publication).

4.50 Goldfein, S., “Impact Resistant Concrete Admixture,” United States Patent 3,645,961, Feb 29, 1972.

4.51 Brochenbrough, T. W., and Davis, C. F., “Progress Report on Fiber Reinforced Concrete,” The Delaware State Highway Department, Civil Engineering Department, University of Delaware, Newark, Jan. 1970.

4.52 Brochenbrough, T. W., and Patterson, D. N., “Fiber Reinforced Methacrylate Polymer Concrete,” ACI JOURNAL, July-Aug. 1982, pp. 325-328.

4.53 Casamatta, D. M., “Synthetic Fiber Reinforced Concrete,” *Code News*, Vol. 1986, No. 6, Nov.-Dec. 1986.

4.54 Jakel, G. R., “Fiber Reinforced Concrete Products and Their Formation; Polyesters, Cellulose Pulp,” U.S. Patent #US3899344, Aug. 1975.

4.55 Nagabhushanam, M.; Ramakrishnan, V.; and Vondran, G., “Fatigue Strength of Fibrillated Polypropylene Fiber Reinforced Concrete,” *Transportation Research Record* 1226, National Research Council, Washington D.C., 1989, pp. 36-47.

4.56 Ramakrishnan, V.; Gollapudi, S.; and Zellers, R., *Performance Characteristics and Fatigue of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete*, SP-105, American Concrete Institute, Detroit, 1987, pp. 159-177.

4.57 Ramakrishnan, V.; Wu, G. Y.; and Hosalli, G., “Flexural Fatigue Strength, Endurance Limit, and Impact Strength of Fiber Reinforced Concrete,” *Transportation Research Record* 1226, National Research Council, Washington D. C., 1989, pp. 17-24.

4.58 Vondran, G. L.; Nagabhushanam, M.; and Ramakrishnan, V., “Fatigue Strength of Polypropylene Fiber Reinforced Concretes,” *Fiber Reinforced Cements and Concretes: Recent Developments*, edited by R. N. Swamy and B. Barr, Elsevier Applied Science, London and New York, 1990, pp. 533-543.

4.59 Ramakrishnan, V.; Wu, G. Y.; and Hosalli, G., “Flexural Behavior and Toughness of Fiber Reinforced Concretes,” *Transportation Research Record* 1226, National Research Council, Washington D. C., 1989, pp. 69-77.

4.60 Guirguis, S., and Potter, R. J., “Polypropylene Fibres in Concrete,” *Technical Report* TR/F90, Cement and Concrete Association of Australia, May 1985, 21 pp.

4.61 Malisch, W. R., “Polypropylene Fibers in Concrete—What Do the Tests Tell Us?,” *Concrete Construction*, Apr. 1986, pp. 363-368.

4.62 Hannant, D. J.; Zonsveld, J. J.; and Hughes, D. C., “Polypropylene Film in Cement Based Materials,” *Composites*, Vol. 9, No. 2, Apr. 1978, pp. 83-88.

4.63 Mindess, S., and Vondran, G., “Properties of Concrete Reinforced with Fibrillated Polypropylene Fibres under Impact Loading,” *Cement and Concrete Research*, Pergamon Journals, Ltd., USA, Vol. 18, 1988, pp. 109-115.

4.64 Bhargava, J., and Rhenstrom, A., “Dynamic Strength of Polymer Modified and Fiber Reinforced Concrete,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 7, 1977, pp. 199-208.

4.65 Fairweather, A. D., “The Use of Polypropylene Fiber to Increase Impact Resistance of Concrete,” *Proc. Int’l Bldg. Exhibition Conf. on Prospects for FRC Materials*, London, 1971, Bldg. Research Station, Watford, 1972, pp. 41-43.

4.66 Banthia, N.; Mindess, S.;and Bentur, A., “Impact Behavior of Concrete Beams,” *Materials and Structures* (Paris), Vol. 20, No. 119, 1987, pp. 293-302.

4.67 Banthia, N.; Mindess, S.; and Bentur, A., “Behavior of Fiber Reinforced Concrete Beams under Impact Loading,” *Proc., Sixth Int’l Conf. on Composite Materials*, (ICCM-VI), London, 1987.

4.68 Mindess, S.; Banthia, N.; and Cheng, Y., “The Fracture Toughness of Concrete under Impact Loading,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 20, 1987, pp. 231-241.

4.69 Mindess, S.; Banthia, N.; and Bentur, A., “The Response of Reinforced Concrete Beams with a Fibrous Concrete Matrix to Impact Loading,” *Int’l Journal of Cement Composites* (UK), Vol. 8, No. 3, 1986, pp. 165-170.

4.70 Naaman, A. E.; Shah, S. P.; and Throne, J. L., *Some Developments in Polypropylene Fibers for Concrete*, SP-81, American Concrete Institute, Detroit, 1984.

4.71 Swamy, R. N., and Stavrides, H., “Influence of Fiber Reinforcement on Restrained Shrinkage and Cracking,” ACI JOURNAL, Vol. 76, No. 3, Mar. 1979, pp. 443-460.

4.72 Ramakrishnan, V., “Materials and Properties of Fiber Reinforced Concrete,” *Proceedings* of the International Symposium on Fiber Reinforced Concrete, Madras, India, Dec. 1987, pp. 2.3-2.23.

4.73 Gopalaratnam, V. S.; Shah, S. P.; Batson, G. B.; Criswell, M. E.; Ramakrishnan, V.; and Wecharatana, M., “Fracture Toughness of Fiber Reinforced Concrete,” *ACI Materials Journal*, Vol. 88, No. 4, July-Aug. 1991, pp. 339-353.

4.74 Morgan, D. R.; McAskill, N.; Carette, G. G.; and Malhotra, V. M., “Evaluation of Polypropylene Fiber Reinforced High Volume Fly Ash Shotcrete,” CANMET International Workshop on Fly Ash in Concrete, Calgary, Alberta, Oct. 1990.

4.75 Morgan, D. R., “Freeze-Thaw Durability of Steel and Polypropylene Fiber Reinforced Shotcrete,” CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Montreal, Quebec, Aug. 1990.

4.76 Malhotra, V. M.; Carette, G. G.; Bilodeau, A.; and Dibble, D., “Fiber Reinforced High Volume Fly Ash Shotcrete for Controlling Aggressive Lactates from Exposed Rock Surfaces and Mine Tailings,” CANMET, June1989.

4.77 Grzybowski, M., and Shah, S. P., “Shrinkage Cracking in Fiber Reinforced Concrete,” *ACI Materials Journal*, Vol. 41, No. 148, Sept. 1989.

4.78 Vondran, G., *Making More Durable Concrete With Polymeric Fibers*, Mather International Conference, SP-100, American Concrete Institute, Detroit, May 1987, pp. 377-396.

4.79 Vondran, Gary L., “Plastic Fiber Reinforced Concrete,” *Proceedings* of Concrete Technology Seminar 3, Michigan State University, East Lansing, Feb. 1988, pp. 8.1-8.23.

4.80 *Underwriters Laboratory Fire Resistance Directory*, R11194, DTD, Oct. 15, 1990.

4.81 Kobayashi, K., and Cho, R., “Flexural Characteristics of Steel Fiber and Polypropylene Fiber Hybrid Reinforced Concrete,” *Composites*, Vol. 13, 1982, pp. 164-168.

4.82 Banthia, N., and Sheng, J., “Micro-Reinforced Cementitious Materials,” Materials Research Society Symposium *Proceedings*, Vol. 211, Boston, Nov. 1990.

4.83 Raithby, K. D.; Galloway, J. W.; and Williams, R. T., “Polypropylene Reinforced Cement Composites for Surface Reinforcement of Concrete Structures,” *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 5, No. 3, Aug. 1983, pp. 193-197.

4.84 Zollo, R. F., “Synthetic Fiber Reinforced Concrete: Some Background and Definitions,” Seminar on Polymeric Fibers: Their Effect on Concrete and Concrete Cracking,” World of Concrete 89, Atlanta, Feb. 1989.

4.85 Zollo, R. F., and Hays, C. D., “Fibers vs. WWF as Non-Structural Slab Reinforcement,” *Concrete International*, American Concrete Institute, Vol. 13, No. 11, Nov. 1991, pp. 50-55.

4.86 Ramakrishnan, V. S.; Feldman, R. F.; and Beaudoin, J. J., *Concrete Science, Treatise on Current Research*, Heyden & Sons, Ltd., 1981.

4.87 Hannant, D. J., “Review of the Present Scene,” *Proceedings* of the Symposium on Fibrous Concrete, London, Apr. 1980.

4.88 Krenchel, H., and Shah, S. P., “Applications of Polypropylene Fibers in Scandinavia,” *Concrete International*, Vol. 7, No. 3, Mar. 1985.

CHAPTER 5—NATURAL FIBER REINFORCED CONCRETE (NFRC)

5.1—Introduction

Discontinuous short fibers are widely used in both types of FRC all over the world. In this chapter, attention is focused on the use of naturally occurring fibers for reinforcing concretes, mortars, and cements. Concretes reinforced with naturally occurring fibers are generally termed natural fiber reinforced concrete (NFRC).

Many natural reinforcing materials can be obtained at low levels of cost and energy using locally available manpower and technical know-how. Such fibers are used in the manufacture of low fiber content FRC and occasionally have been used in the manufacture of thin sheet high fiber content FRC.

These fibers are typically referred to as unprocessed natural fibers (UNF).

However, other natural fibers are available that have been processed to enhance their properties. These fibers are derived from wood by chemical processes such as the kraft process. Kraft pulp fibers are used in sophisticated manufacturing processes, such as the Hatschek process, to produce thin sheet high fiber content FRC. These fibers are typically referred to as processed natural fibers (PNF) and concretes made from them as processed natural fiber reinforced concretes (PNFRC).

Although historically many fibers have been used to reinforce various building materials, until recently little scientific effort has been devoted to the use of natural fibers for reinforcement. The use of some of the best known natural fibers such as sisal, coconut, sugarcane bagasse, plantain (banana), palm, etc., have mostly been limited to the production of fabrics, ropes, mats, etc.

In this report, the various types of natural fibers available for reinforcing concretes, the mix proportions, the method of mixing, handling and placing, and the properties of fresh and hardened natural fiber reinforced concretes are described. Additionally, some of the applications of the NFRC are presented.

5.2—Natural fibers

5.2.1—*Unprocessed natural fibers*

Unprocessed natural fibers are available in reasonably large quantities in many countries and represent a continuously renewable resource. UNFs require relatively small amounts of energy and technical know-how for their production compared to some other types of fibers. In the historical context, the use of raw natural fibers in construction substantially preceded the advent of conventional reinforced concrete. Straw-reinforced, sun-dried mud bricks for wall construction, and horse hair in mortar,

Table 5.1— Typical properties of natural fibers

Fiber type	Coconut	Sisal	Sugar cane Bagasse	Bamboo	Jute	Flax	Elephant grass	Water reed	Plantain	Musamba	Wood fiber (kraft pulp)
Fiber length, in.	2-4	N/A	N/A	N/A	7-12	20	N/A	N/A	N/A	N/A	0.1-0.2
Fiber diameter, in.	0.004-0.016	N/A	0.008-0.016	0.002-0.016	0.004-0.008	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.001-0.003
Specific gravity	1.12-1.15	N/A	1.2-1.3	1.5	1.02-1.04	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1.5
Modulus of elasticity, ksi	2750-3770	1880-3770	2175-2750	4780-5800	3770-4640	14,500	710	750	200	130	N/A
Ultimate tensile strength, psi	17,400-29,000	40,000-82,400	26,650-42,000	50,750-72,500	36,250-50,750	145,000	25,800	10,000	13,300	12,000	101,500
Elongation at break, percent	10-25	3-5	N/A	N/A	1.5-1.9	1.8-2.2	3.6	1.2	5.9	9.7	N/A
Water absorption, percent	130-180	60-70	70-75	40-45	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	50-75

Note: N/A = properties not readily available or not applicable.
Metric equivalents: 1 in. = 25.4 mm; 1 ksi = 1000 psi = 6.895 MPa

Table 5.2— Mechanical properties of several types of fibers

Type of fiber	Average diameter, in.	Average length, in.	Absorption after 24 hr, percent	Average fiber density (SG)	Average tensile strength, psi	Average bonding strength, psi	Average elongation, percent
Bagasse	0.020	1.38	122.5	0.639	3,570	36	N/A
Coconut	0.027	11.02	58.5	0.580	8,825	40	2.600
Jute	0.004	15.75	62.0	1.280	53,500	20	N/A
Maguey	0.014	15.75	63.0	1.240	54,400	N/A	N/A
Lechuguilla	0.014	15.75	102.0	1.360	54,100	N/A	N/A
Banana	0.011	3.70	276.0	0.298	10,960	35	3.000
Guaney (palm)	0.017	17.44	129.9	1.195	50,000	40	2.880
Bamboo	Variable	Variable	51.0	0.720	54,680	45	1.800

Note: N/A = Not available
Metric equivalents: 1 in. = 25.4 mm; 1 psi = 0.006895 MPa

are typical examples of how natural fibers were used long ago.

In the late 1960s, a systematic evaluation of the engineering properties of natural fibers, and of cement composites made with these fibers was undertaken. The results of these investigations indicated that these fibers could be used successfully to make thin cement sheets for walls and roofs. Appropriate manufacturing processes were subsequently developed for commercial production in various countries of Central America, Africa, and Asia. Products made with portland cement and unprocessed natural fibers such as coconut coir, sisal, sugarcane bagasse, bamboo, jute, wood, and vegetable fibers have been tested for their engineering properties and possible use in buildings in at least 40 different countries [5.1-5.9]. Although the results were encouraging, some deficiencies were found in their durability. These seem to have resulted from the reaction between the cement paste and the fibers and swelling of the fibers in the presence of moisture. A number of researchers are now investigating remedial measures for improving durability.

5.2.2—*Processed natural fibers*

Processed natural fibers have been used in commercial production for the manufacture of thin-sheet fiber reinforced cement products since the mid-1960s initially as an adjunct to asbestos and since the early 1980s as a sole reinforcing fiber. Experimental use of these fibers greatly precedes their large scale commercial use. The first experiment with the use of wood pulp as a replacement for asbestos in asbestos cement dates back to World War I. The Norwegian fiber cement industry was forced to manufacture wood pulp reinforced cement sheets for commercial use during this period because they were unable to obtain their usual supplies of asbestos due to the war.

5.2.3—*Mechanical properties of natural fibers*

5.2.3.1 *Mechanical properties of unprocessed natural fibers*—Information on mechanical properties of unprocessed natural fibers is available [5.5-5.40]. In this section, a brief summary of the results of research to determine the mechanical properties of various types of unprocessed natural fibers is presented. The types of fibers for which the mechanical properties have been evaluated are given in Table 5.1. A brief description for some of the more commonly found natural fibers is presented below.

a. *Coconut fiber.* A mature coconut has an outer covering made of fibrous material. This part of the coconut, called the husk, consists of a hard skin and a large amount of fibers embedded in a soft material. The fibers can be extracted simply by soaking the husk in water to decompose the soft material surrounding the fibers. This process, called retting, is widely used in the less developed countries. Alternatively, a mechanical process [5.10] can be used to separate the fibers. Coconut cultivation is restricted to the tropical regions of Africa, Asia, and Central America.

b. *Sisal fiber*. In Australia, sisal fibers have been successfully used for making gypsum plaster sheets [5.7]. A considerable amount of research has been carried out in Sweden for developing good quality concrete products reinforced with sisal fibers [5.9]. These fibers are stronger than most of the other natural fibers, as can be seen from Table 5.1.

c. *Sugar cane bagasse fiber.* Sugar cane is cultivated in both tropical and sub-tropical regions. Sugar cane bagasse is the residue remaining after the extraction of the juice and contains about 50 percent fiber and 30 percent pith with moisture and soluble solids constituting the remaining 20 percent. In order to obtain good quality fibers, the pith and other solids are removed from the fibers. The properties of bagasse fibers depend, to a very large extent, on the variety of the sugar cane, its maturity, and on the efficiency of the milling plant. The properties given in Table 5.1 are considered to be typical.

d. *Bamboo fiber*. Bamboo belongs to the grass family and can grow to a height of 50 ft (15 m) with diameters varying within the range of 1 to 4 in. (25 to 100 mm). It grows naturally in tropical and sub-tropical regions. Dried bamboo stems are commonly used for building temporary structures such as scaffolding. They may also be fabricated to form a continuous reinforcing material for concrete. Bamboo fibers are strong in tension (Table 5.1) and can be used as a reinforcing material. However, they have a high water absorption capacity, low modulus of elasticity, and special equipment may be needed to extract them from the stems.

e. *Jute fiber*. Jute is grown mainly in India, Bangladesh, China, and Thailand. It is grown solely for its fiber, which is traditionally used for making ropes and bags to transport grains and other materials ranging from cement to sugar. Strong in tension (Table 5.1), jute fiber can also be used in a cement matrix. The process of obtaining jute fibers is very simple. Mature plants are cut and soaked in water for about 4 weeks, which completely decomposes the bark. The fibers thus exposed are then stripped from the stem, washed, and dried.

f. *Flax.* Flax is a slender and erect plant grown mainly for its fiber. Both the tensile strength and the modulus of elasticity of flax are extremely high [5.13] compared to those of other natural fibers, as may be seen from Table 5.1.

g. *Other vegetable fibers*. Of the various vegetable fibers, only a few have been found to be potentially suitable as reinforcing materials. The mechanical properties of the more promising fibers, namely elephant grass, water reed, plantain, and musamba, are listed in Table 5.1. Investigations have also been carried out to explore the possibility of using other natural fibers such as palm fiber and akwara fiber as reinforcing materials for concrete [5.14]. These fibers are usually removed manually from the stem of the plant.

5.2.3.2 *Mechanical properties of processed natural fibers*—Processing of plant materials to extract the fibers is referred to as pulping and the principal plant materials used for pulping are trees. Pulping involves breaking of the bond between fibers in solid softwoods and hardwoods.

Pulping processes are classified as either full-chemical, semi-chemical, or mechanical depending on the nature of the defiberization process. Mechanical pulps are made essentially by grinding the wood to separate the fibers, while in chemical pulps the wood is chipped into approximately 1 inch cubes and cooked in alkalis to dissolve the material that holds the fi-

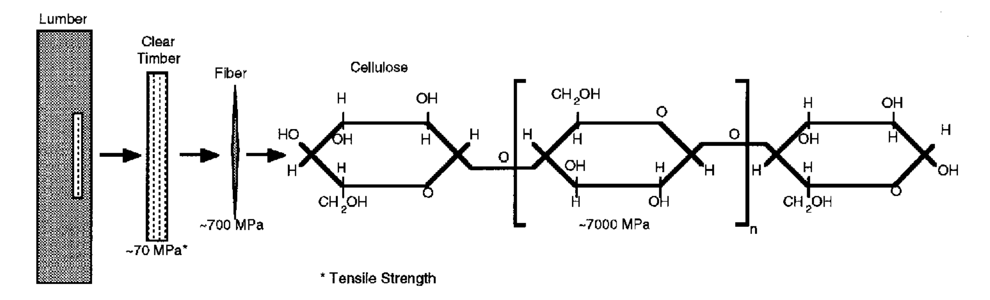


Fig. 5.1—A schematic representation of the substructure of a tree

bers together. Semi-chemical pulps are made with a combination of chemical cooking, which softens the fiber, followed by mechanical treatment to separate the fibers.

It has been found that those components of the wood that are removed in the chemical process are susceptible to alkalis and are responsible for the degradation of unprocessed natural fiber reinforced cements and concretes. Thus chemical (kraft) pulps are more commonly used for the reinforcement of cement. Typical mechanical properties of kraft pulps are also included in Table 5.1.

Figure 5.1 briefly illustrates the structure of wood. A piece of clear timber may attain a tensile strength of approximately 10 ksi (69 MPa). But lumber pieces often contain defects. Individual fibers which constitute the reinforcing unit of timber may have tensile strengths as high as 100 ksi (690 MPa) or more [5.33]. Cellulose, the primary chemical constituent of natural fibers, exhibits a tensile strength of approximately 930 ksi (6400 MPa). Among commercial trees, softwoods are the source of the so-called long fibers with typical lengths ranging from 0.1 to 0.3 in. (2 to 7 mm). Softwood fibers have widths ranging from 15 to 80 microns. Hardwoods yield fibers that, on the average, are about $^1/_3$ to $^1/_2$ the length and about $^1/_2$ the width of softwood fibers. Even within the same tree species, fiber strengths can vary considerably.

5.3—Unprocessed natural fiber reinforced concrete

5.3.1—*Materials and mixing*

5.3.1.1 *Mix proportions*—Mix proportions for unprocessed natural fiber reinforced concrete cannot be generalized since there are a variety of natural fibers that can be used in conjunction with the other standard ingredients such as cement, pozzolans, fine aggregates, water, and admixtures.

The types of natural fibers that can be used with these standard ingredients include: bagasse, sisal, jute, coconut, banana, and palm. A brief description for each of the constituents which is used for obtaining fiber reinforced concrete is outlined below.

5.3.1.2 *Cement*—A cement that meets the ASTM standard specification C 150 or C 595 can be used. The type of cement recommended is Type I, although Type III (high-early strength) cement can be used in order to reduce hardening retardation caused by the glucose present in most natural fibers.

5.3.1.3 *Aggregates*—The aggregates should meet the gradation requirements specified by ASTM C 33, Standard Specification for Concrete Aggregates.

5.3.1.4 *Water and admixtures*—The water to be used for the mix should be clean and of good quality. Admixtures such as accelerating agents may be used in order to decrease the influence of the glucose retardant. If mild steel rebars are not used as additional reinforcement, calcium chloride could be used. Water-reducing admixtures and high-range water-reducing agents can be added in order to increase the workability when plastering. The use of organic-microbiocide is encouraged, for the prevention of bacterial attack of organic fibers.

5.3.1.5 *Fibers*—The length of fibers may vary from 1 to 20 in. (25 to 500 mm). Because fibers are natural materials, they are not uniform in diameter and length. Typical values of diameter for unprocessed natural fibers vary from 0.004 to 0.03 in. (0.10 to 0.75 mm) [5.2]. The mechanical properties of fibers are summarized in Table 5.2.

5.3.1.6 *Methods of mixing*—The two methods of mixing and placing are (1) wet mix and (2) dry-compacted mix. In the wet mix, a low volume fraction of fibers is used. The water to be added to the mix has to take into account the high natural water content in the natural fibers. The mixing procedure must comply with ASTM C 94 process and portions of ACI 304 recommendations. Trial batches are recommended and a batching plant is required. The recommended mixing procedure is to add cement with water and additives to form a slurry. Then the fine aggregates are added. Finally, fiber is added and dispersed into the slurry. The sampling is to be done according to ASTM Practice C 172 and C 685. For compressive and flexural strength testing, ASTM C 39 and C 78 are to be followed.

The dry-compacted mix is generally used for industrial or semi-industrial projects. In the dry-compacted mix, the volume fraction of fiber used is about 10 times the volume fraction used in wet mix. The fibers are in a saturated-surface-dry condition for this type of mix. Trial batches are recommended. The recommended mixing procedure is to add fibers in saturated-surface-dry condition to the cement and aggregates and then add a very limited amount of water. Mixing can be done by hand, although mixing according to ASTM C 94 is recommended. For compressive and flexural strength, ASTM C 39 and ASTM C 78 are to be followed. The dry mix samples are cast followed by the application of pressure since very little or no water is added to the mix.

The volume percentage of unprocessed natural fibers used in a mix varied from 3 to 30 percent depending on the type of fiber used and the manufacturing procedure. Typical mix proportions for coconut fiber reinforced concrete for both the wet mix and the dry-compacted mix are presented in Table 5.3.

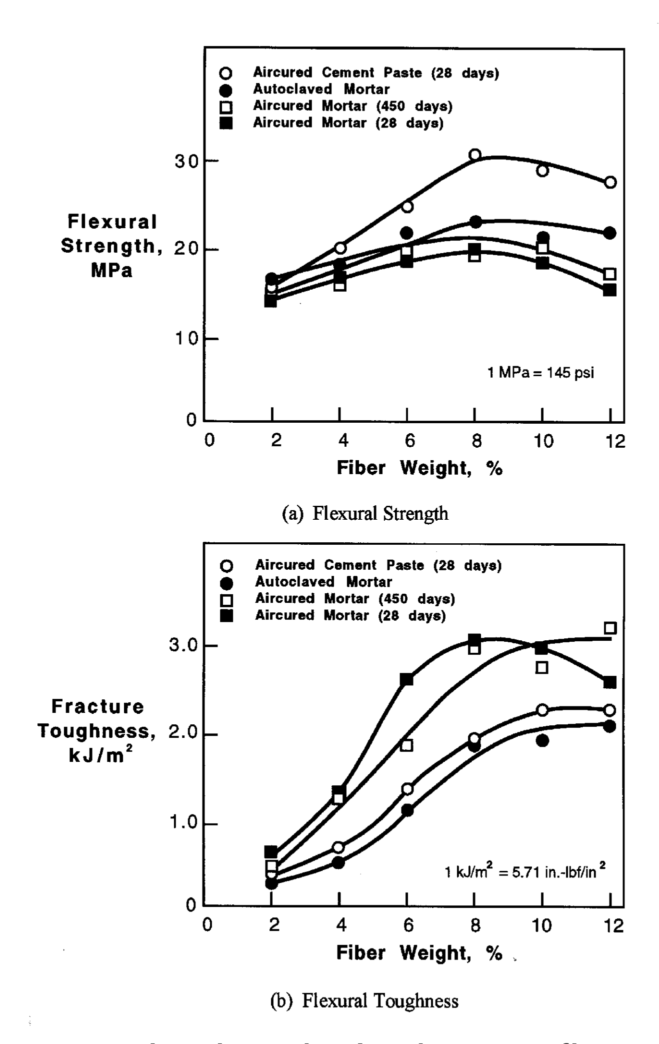


Fig. 5.2—Flexural strength and toughness versus fiber weight fraction for cements and mortars reinforced with wood fiber (Kraft pulp)

5.3.2—*Properties of unprocessed natural fiber reinforced concrete*

5.3.2.1 *General*—The properties of unprocessed natural fiber reinforced concrete, like those of any fiber reinforced concrete, are affected by a large number of factors. The major ones are listed in Table 5.4. Clearly, the type and length of fibers, as well as the volume fraction, are the most significant factors. Test results [5.10] show that for natural fibers the minimum fiber addition to provide some improvement in the mechanical properties of the cement composite is about 3 percent by volume. The impact resistance is increased in most cases regardless of the fiber volume fraction, but other properties are not improved significantly and remain similar to plain concrete. The properties of fresh and hardened unprocessed natural fiber reinforced concretes are briefly discussed in the following sections.

5.3.2.2 *Fresh concrete*—The addition of unprocessed natural fibers to concrete leads to reduced workability due to the increased surface area and water absorption of the fibers. It is important, however, that the mix be workable. A mix that is too stiff or too dry could lead to an inadequately compacted final product which is likely to contain voids and/or honeycombs. A mix that is too wet will, on the other hand, lead to unnecessary strength reduction.

Table 5.3— Mix proportions for wet mix and dry-compacted mix

Ingredient	Wet mix	Dry-compacted mix
Cement, lb/yd^3	925-1000	880-925
Coconut fiber, lb/yd^3	30	370
Sand, lb/yd^3	2500	2500
Water -in fiber, lb/yd^3 -added, lb/yd^3	3.5 (estimate of natural condition) 630	460 (estimate of saturated-surface-dry condition) 800
Additives -Calcium chloride, lb -Microbiocide, oz -Water reducers	 35 1.9 none	 35 2.1 none

Metric equivalents: 1 lb/yd^3 = 0.593 kg/m^3; 1 lb = 0.454 kg; 1 oz = 28.35 g

Table 5.4— Factors affecting properties of natural fiber reinforced concretes

Factors	Variables
Fiber type	Coconut, sisal, sugarcane bagasse, bamboo, jute, wood, vegetables (akwara, elephant grass, water reed, plantain, and musamba)
Fiber geometry	Length, diameter, cross-section, rings, and hooked ends
Fiber form	Mono-filament, strands, crimped, and single-knotted
Fiber surface	Smoothness, presence of coatings
Matrix properties	Cement type, aggregate type and grading, additive types
Mix proportioning	Water content, workability aids, defoaming agents, fiber content
Mixing method	Type of mixer, sequence of adding constituents method of adding fibers, duration and speed of mixing
Placing method	Conventional vibration, vacuum dewatering for sprayed-up member, vacuum-press dewatering for slurry-dewatered member, extrusion and guniting
Casting technique	Casting pressure
Curing method	Conventional, special methods

The other important aspect is “balling” of fibers. The extent to which balling may occur in a given mix is determined by the type and length of fibers used, the volume fraction of fibers, and the maximum size of the aggregate. Balling should not be allowed to occur as it has a detrimental effect on the strength. Certain mixing methods can be employed to minimize the balling effect. Normally, the progressive addi-

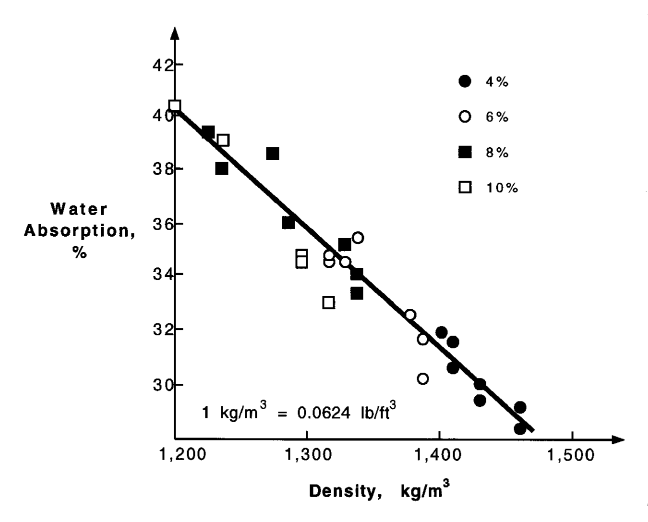


Fig. 5.3—Relationship between water absorption and density of slurry-dewatered softwood Kraft fiber-cement composites at different weight fractions

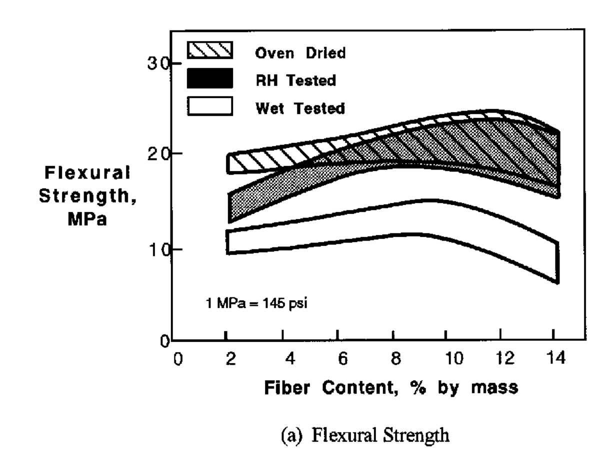
tion of fibers at the end of the mixing process, after the other ingredients have been mixed, reduces the balling effect. Also, the use of high-range water-reducing admixtures is found to substantially increase workability without adversely affecting strength.

Depending upon the amount of fibers and the method of mixing (dry batch or wet batch), unit weight may be reduced to 94 lb/ft^3 (1500 kg/m^3) (compared to normal concrete which is 145 to 155 lb/ft^3 (2300 to 2500 kg/m^3). The workability of the dry-compacted mix is normally poor.

5.3.2.3 *Hardened concrete*—One of the important properties of the hardened composite is its strength. Since the unreinforced cement mortar matrix possesses adequate strength for many applications, but is brittle, it is customary to study the influence of fibers on the increased ductility that can be achieved. Apart from strength, other aspects such as deformation under load (stiffness), durability, cracking characteristics, energy absorption, water tightness, and thermal properties should also be evaluated. The most important contribution of the fibers can be rationally evaluated by determining the fracture toughness of the composite [5.14].

Table 5.5 shows the strength characteristics of a typical composite, reinforced with jute fibers [5.11]. From this table it can be seen that, in general, compressive strength is not significantly affected by the addition of fibers, while tensile and flexural strength and toughness are all substantially increased. Furthermore, for a particular fiber there exists an optimum value for both volume fraction and fiber length. Detailed information on the behavior of composites made with jute, coconut, sisal, bagasse, bamboo, flax, and some other vegetable fibers can be found in references 5.11-5.22.

As mentioned earlier, a successful construction material should possess desirable serviceability characteristics in addition to strength. A number of investigators have studied various natural fiber reinforced concretes to understand their behavior in terms of permeability, water absorption, thermal conductivity, sound transmission, linear expansion, and combustibility. Typical results of these properties, are given in Tables 5.6 and 5.7 [5.17, 5.21].



(a) Flexural Strength

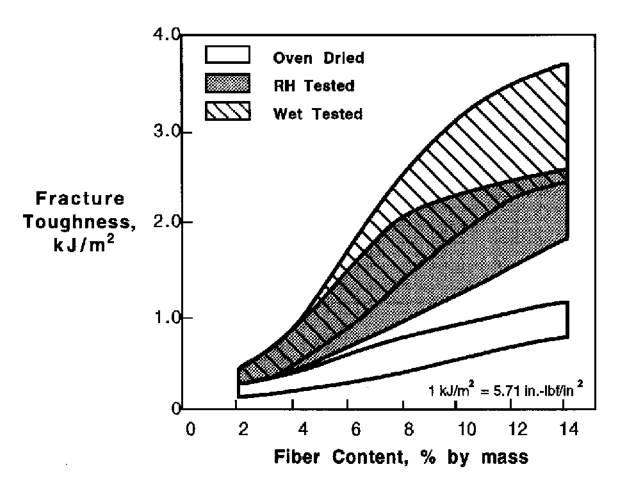


Fig. 5.4—Effects of moisture content on flexural strength and toughness of wood reinforced cement at different fiber contents

Unfortunately, the amount of available test data on the durability of unprocessed natural fiber reinforced concrete are limited. The following observations can, nevertheless, be made, based on the existing literature [5.13].

a. Unprocessed natural fiber reinforced concrete is more vulnerable than other fiber reinforced concretes in terms of durability. The highly alkaline pore-water in the concrete seems to deteriorate the fibers.

b. Durability can be substantially improved by replacing 40 to 50 percent of the cement with silica fume, since the addition of silica fume reacts with lime and considerably reduces the alkalinity of the pore-water.

c. Improved durability can be achieved by coating the fiber with suitable chemicals such as formic and stearic acid.

5.3.2.4 *Placing and finishing*—The placing and finishing of the unprocessed natural fiber reinforced concrete is dependent on the method of mixing used (wet mix or dry-compacted mix). Placing of the wet mix may be achieved by using conventional equipment. Internal or external vibrators should be used. Other properties such as workability can be measured by the slump test or the K-slump tester as per the

Table 5.5— Effect of fiber length and volume fraction on strength parameters of jute-fiber reinforced cement composites

Mix ratio cement/sand	Fiber volume fraction, percent	Fiber length,in.	Compressive strength, psi	Tensile strength, psi	Modulus of rupture, psi	Flexural toughness, in.-lb	Compressive Young's modulus, ksi	Tensile Young's modulus, ksi
1:0	0	—	4560	175	410	0.3	2250	1400
	1	1.0	5175	200	540	4.9	2050	1450
	2	1.0	4350	285	650	7.7	1800	1700
	3	1.0	5430	300	555	6.6	1850	1600
	4	1.0	5075	245	480	6.1	1900	1650
	2	0.5	4435	250	565	5.8	2200	1500
	2	0.7	4160	340	600	7.4	1600	1450
	2	1.5	4520	255	640	7.3	1700	1350
1:1	0	—	5570	295	610	0.5	2150	2250
	2	0.5	5430	365	815	7.8	2050	2600
	2	0.7	4705	315	730	8.9	2050	1950
	2	1.0	4750	315	650	9.7	1800	2100
	2	1.5	4055	305	580	7.2	1250	2550
1:2	0	—	5070	305	545	0.4	1750	2600
	2	0.5	4055	335	645	7.3	1450	3300
	2	0.7	4165	360	670	8.9	1950	3250
	2	1.0	4710	295	570	7.1	2050	2300
	2	1.5	3620	235	545	6.6	2200	2400

Metric equivalents: 1 in. = 25.4 mm; 1 ksi = 1000 psi = 6.895 MPa; 1 in.-lb = 0.113 Nm

Table 5.6— Comparison of the properties of elephant-grass fiber reinforced roofing sheets with those reinforced with asbestos fibers

Properties	Cement sheets reinforced with elephant-grass fibers	Cement sheets reinforced with asbestos fiber
Consistency at 25 percent water, percent	15	11
Impact strength, ft-lb	2.08	2.98
Flexural strength, psi	1500	2600
Impermeability	Excellent	Excellent
Water absorption, percent	16.3	20.6
Coefficient of thermal conductivity, BTU/(ft x h x degrees F)	0.191	0.208
Sound transmission of 833 Hz signal, percent	22 when dry 30 when wet	26 when dry 40 when wet
Combustibility (BS 476-Part 4)	Non-combustible	Non-combustible
Linear expansion, percent	0.22	0.24
Density, lb/ft^3	110	96

Metric equivalents: 1 ft-lb = 1.356 J; 1 psi = 0.006895 MPa; 1 BTU/(ft x h x degrees F) = 1.731 W/(m x degrees K); 1 lb/ft^3 = 16.019 kg/m^3

Table 5.7— Comparison of the physical properties of coconut-fiber reinforced roofing sheets with those of asbestos roofing sheets

Characteristics and properties	Coconut-fiber reinforced roofing sheets	Asbestos roofing sheets
Pitch of corrugation, in.	5.75	5.75
Depth of corrugation, in.	1.9	1.9
Length of sheets, in.	59-79	59-118
Width of sheets, in.	39	41
Weight, lb/ft^2	2.4-2.5	2.8
Breaking load for a span of 24 in., lb/ft	3.4	—
Breaking load at a span of 40 in., lb/ft	1.3	3.4
Thermal conductivity, kcal/mm/m	0.009	0.024
Water permeability through finished surface in 24 hours	almost nil	—
Acid resistance as per I.S.: 5913-1970, ksi	236	235

Metric equivalents: 1 in. = 25.4 mm; 1 lb/ft^2 = 4.88 kg/m^2; 1 lb/ft = 14.595 N/m; 1 ksi = 6.895 MPa

ASTM recommended Penetration Test. Air content in the mix can be measured using ASTM C 231 or C 173.

For placing the dry-compacted mix, there is a need for a special type of formwork since the mix is dry and has to be compacted with some pressure within the formwork. Once the dry mix is placed inside the formwork, it is subjected to a confining pressure of about 30 to 70 psi (0.2 to 0.5 MPa). This confining pressure is applied for a period of about 24 hours. Care should be taken not to apply a larger pressure than needed, since water (which is critical for hydration) may be squeezed out. The air content of the mix can be obtained using ASTM C 231 or ASTM C 173. The unit weight can be obtained using ASTM C 130.

5.4—Processed natural fiber reinforced concrete

5.4.1—*Production methods*

The slurry-dewatering technique is commonly used for the production of processed fiber reinforced cements and concretes. In this method, the fibrous cement product is formed from a dilute slurry (about 20 percent solids) of fiber-cement or fiber-mortar. The excess water is removed from the slurry through the application of vacuum dewatering and pressure [5.35]. The product is then cured in air or in an autoclave to develop its strength and other mechanical properties. Industrial production of this composite now occurs in Europe, Australia, North America, South America, Asia, and South Africa using kraft wood fibers with good results.

Hand methods can also be used by methods similar to that used in the manufacture of sisal/gypsum plaster composites [5.50]. In this case, the fiber is rolled by hand into a slurry of cement and fine sand and compacted by rolling with a toothed roller. Clearly this method is slow and labor intensive and is not used in countries where labor is in short supply and expensive. This method is not appropriate for manufacture of kraft wood pulp reinforced boards since the fibers are not long enough.

5.4.2—*Properties of the hardened processed natural fiber reinforced concretes*

The performance of PNFRCs in both the short and long term depends on the methods used for their curing and their mix proportions. The mix proportions used for commercial products are not readily available.

Figures 5.2a and 5.2b show typical effects of kraft pulp fiber weight fraction on the flexural strength and toughness (area underneath the flexural load-deflection curve) of cementitious materials with different mix proportions that have been cured in different conditions. The results (all obtained at 50 percent R.H.) are indicative of improvements in flexural performance of cementitious materials resulting from kraft pulp fiber reinforcement.

In the case of slurry-dewatered wood fiber reinforced cement, it has been reported [5.37] that the density of the composite decreases and its water absorption capacity increases with increasing fiber content. The overall density of the composite reflects the changing proportions of the constituent fiber and the matrix. The void volume of the composite also increases, but in a non-linear fashion, as the fiber content increases. The amount of water absorbed by wood fiber reinforced cement depends on the density of the composite, Fig. 5.3 [5.35].

As far as the long-term durability of wood fiber reinforced cement composites is concerned, it should be noted that kraft pulps have relatively low lignin contents. Noting the susceptibility of lignin to alkaline attack, kraft pulps possess better durability characteristics than mechanical wood fibers in the highly alkaline cementitious environment [5.38].

Studies on processed natural fiber reinforced cement have shown that increase in moisture content tends to decrease the flexural strength and increase the flexural toughness of the composites. Figures 5.4a and 5.4b compare the flexural strength and toughness values, respectively, of slurry-dewatered kraft pulp reinforced cement with different fiber contents tested in wet or oven-dried conditions, or in an environment of 50 percent R.H. Increase in moisture content seems to weaken the bonding of matrix to fibers, thus encouraging fiber pull-out rather than rupture at cracks. The weakened bond reduces flexural strength, while the frictional energy consumed during pull-out tends to increase the fracture toughness of the composite [5.37].

Further details on the performance of air-cured composites are given in References 5.42 and 5.43. Autoclave-cured composites are dealt with in detail in Reference 5.41. The long-term performance of both autoclaved-cured and air-cured processed natural fiber cements is given in References 5.45 to 5.49.

5.5—Practical applications

In Africa, sisal fiber reinforced concrete has been used extensively for making roof tiles, corrugated sheets, pipes, silos, and gas and water tanks [5.22]. Elephant grass fiber-reinforced mortar and cement sheets are being used in Zambia for low-cost house construction [5.23], while wood and sisal fibers are being used for making cement composite panel lining, eaves, soffits, and for sound and fire insulation.

Kraft pulp fiber reinforced cement has found major commercial applications in the manufacture of flat and corrugated sheet, non-pressure pipes, cable pit, and outdoor fiber reinforced cement paste or mortar products for gardening [5.33-5.39, 5.41-5.49]. The durability of these products in outdoor exposure has been demonstrated with nearly 10 years of commercial use of these materials.

5.6—Summary

Naturally available reinforcing materials can be used effectively as reinforcement in portland cement concrete. Natural fiber reinforced concrete is suitable for low-cost construction, which is very desirable for developing countries. It is important for researchers, design engineers, and the construction industry to vigorously pursue the use of local materials. For economical engineering solutions to a variety of problems, natural fiber reinforced concrete offers a viable alternative that needs to be fully investigated and exploited.

Wood fibers derived from the Kraft process possess highly desirable performance-to-cost ratios, and have been successfully substituted for asbestos in the production of thin-sheet cement products, such as flat and corrugated panels and non-pressure pipes.

5.7—Research needs

The durability and performance of processed natural fiber reinforced cement is documented better than FRC made with unprocessed fibers. While the strength and elastic modulus of cement products reinforced with processed natural fibers (e.g., kraft pulp) seem to actually increase upon weathering, more research is needed regarding the potential for embrittlement under exposure to some aggressive environments.

The durability and moisture-sensitivity of unprocessed natural fibers are among the critical aspects of these composites that need to be further investigated. Research is needed to fully understand the mechanisms by which moisture and aggressive environments change the failure mechanisms and thus affect the strength and toughness characteristics of natural fiber reinforced composites. Potentials for the refinement of cementitious matrices in cellulose-cement composites to improve the durability characteristics also need further investigation. These refinements may be concerned with reducing the alkalinity and permeability of the matrix.

5.9—Cited references

5.1 Shah, S. P., "Fiber Reinforced Concretes," *Handbook of Structural Concrete*, edited by F. K. Kong, R. H. Evans, E. Cohen, and F. Roll, McGraw-Hill, U.K., 1983.

5.2 Shah, S. P., and Batson, G. B., *Fiber Reinforced Concrete—Properties and Applications*, SP-105, American Concrete Institute, Detroit, 1987.

5.3 Castro, J., and Naaman, A. E., "Cement Mortar Reinforced with Natural Fibers," ACI JOURNAL, *Proceedings*, Vol. 78, No. 1, Jan.-Feb. 1981, pp. 69-78.

5.4 ACI Committee 544, *Fiber Reinforced Concrete*, SP-81, American Concrete Institute, Detroit, 1984.

5.5 Aziz, M. A.; Paramaswivam, P.; and Lee, S. L., "Concrete Reinforced with Natural Fibers," *New Reinforced Concretes*, edited by R. N. Swamy, Surrey University Press, U.K., 1984, 106-140.

5.6 Aziz, M. A.; Paramasivam, P.; and Lee, S. L., "Prospects of Natural Fiber Reinforced Concretes in Construction," *Int. J. Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 3, No. 2, 1981, pp. 123-132.

5.7 Mansur, M. A., "Jute Fiber Reinforced Composite Building Materials," *Proc. 2nd Australian Conf. Eng. Materials*, University of New South Wales, 1981, pp. 585-596.

5.8 Paramasivan, P.; Nathan, G. K.; and Das Gupta, N. C., "Coconut Fiber Reinforced Corrugated Slabs," *Int. J. Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 6, No. 1, 1984, pp. 19-27.

5.9 Gram, H. E., and Skarendahl, A., "A Sisal Reinforced Concrete: Study No. 1 Material," *Report* No. 7822, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1978, pp. 1-15.

5.10 Racines, P. G., and Pama, R. P., "A Study of Bagasse Fiber-Cement Composite as Low-Cost Construction Materials," *Proc. Int. Conf. Materials for Developing Countries*, Bangkok, 1978, pp. 191-206.

5.11 Pakotiprapha, B.; Pama, R. P.; and Lee, S. L., "Behaviour of Bamboo Fiber-Cement Paste Composites," *J. Ferrocement*, Vol. 13, No. 3, 1983, pp. 235-248.

5.12 Campbell, M. D., and Coutts, R. S. P., "Wood Fiber-Reinforced Cement Composites," *J. Material Science* 15, 1980, pp. 1962-1970.

5.13 Coutts, R. S. P., "Flax Fibers as a Reinforcement in Cement Mortars," *Int J. Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 5, No. 4, 1983, pp. 257-262.

5.14 Uzomaka, O. J., "Characteristics of Akwara as Reinforcing Fiber," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 28, No. 96, 1976, pp. 162-167.

5.15 Lewis, G., and Mirihagalia, P., "Natural Vegetable Fibers as Reinforcement in Cement Sheets," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 31, No. 107, 1979, pp. 104-108.

5.16 Robles-Austriaco; Pama, R. P.; and Valls, J., "Reinforcing with Organic Materials," *Concrete International*, American Concrete Institute, Vol. 5, No. 11, 1983, pp. 22-26.

5.17 Weerasinghe, A. L. S. D., "Fundamental Study on the Use of Coir-Fiber Board as a Roofing Material," M. Eng. Thesis, The Asian Institute of Technology, Bangkok, 1977.

5.18 Lewis, G., and Mirihagalia, P., "A Low-Cost Roofing Material for Developing Countries," *Building and Environment*, Vol. 14, No. 2, 1979, pp. 131-134.

5.19 Swift, P. G., and Smith, R. B. L., "Sisal-Cement Composites as Low-Cost Construction Materials," *Appropriate Technology*, London, Vol. 6, No. 3, 1979, pp. 6-8.

5.20 Everett, A., *Materials*, Batsford Technical Publications, London, 1981, pp. 227-237.

5.21 "New—A Wood-Fiber Cement Building Board," *Australia News*, CSIRO Industrial New Council of Scientific and Industrial Research, 1982.

5.22 Coutts, R. S. P., and Ridikos, V., "Refined Wood Fiber-Cement Products," *APPITA*, Vol. 35, No. 5, 1982, pp. 395-400.

5.23 Subrahmanyam, B. V., "Bamboo Reinforcement for Cement Matrices," *New Reinforced Concretes*, edited by R. N. Swamy, Surrey University Press, U.K., 1984, pp. 141-194.

5.24 Narayana, S. K., and Rehman, P. M. A., "Bamboo-Concrete Composite Construction," *J. Inst. of Engineers*, India, Vol. 42, 1962, pp. 426-440.

5.25 Youssef, M. A. R., "Bamboo as a Substitute for Steel Reinforcement in Structural Concrete," *New Horizons in Construction Materials*, 1, edited by H. Y. Fang, Envo Publishing Co., Lehigh Valley, 1976, pp. 522-554.

5.26 "The Use of Bamboo and Reeds in Building Construction," *Publication* No. St/So/113, Department of Economic and Social Affairs, United Nations, New York, 1972.

5.27 Murthy, D. K., and Deshpande, C. V., "Some New Techniques to Improve the Structural Behavior of Bamboo Reinforced Concrete for Low-Cost Rural Housing," *Proc. National Seminar on Material Science and Technology*, Madras, India, 1973, pp. 211-2113.

5.28 Cox, F. B., and Geymayer, H. G., "Expedient Reinforcement of Concrete for Use in South-East Asia: Report I—Preliminary Test of Bamboo," *Technical Report* No. C-69-3, U.S. Army Corp. of Engineers, 1969.

5.29 Purushotham, A., "Utilization of Bamboo," *J. Timber and Dry Preservatives Association of India*, Vol. 9, 1963, pp. 2-19.

5.30 Hass, A. M., *Precast Concrete: Design and Applications*, Applied Science Publishers, London, 1983, pp. 117-124.

5.31 Glenn, H. E., "Bamboo Reinforcement in Portland Cement Concrete," *Bulletin* No. 4, Clemson Agricultural College, Clemson, 1950.

5.32 Goldfein, S., "Fibrous Reinforcement for Portland Cement," *Modern Plastics*, Vol. 42, No. 8, 1965, pp. 156-160.

5.33 Coutts, R. S. P., "Sticks and Stones," *Forest Products News Letter*, CSIRO Division of Chemical and Wood Technology (Australia), Vol. 2, No. 1, Jan. 1988, pp. 1-4.

5.34 Suschland, O., and Woodson, G. E., "Fiber Board Manufacturing Practices in the United States," *United States Dept. of Agriculture, Forest Service, Agriculture Handbook*, No. 640, 1986, 263 pp.

5.35 Coutts, R. S. P., and Michell, A. S., "Wood Pulp Fiber Cement Composites," *Journal of Applied Polymer Science*, Applied Polymer Symposium 37, John Wiley and Sons, Inc., 1983, pp. 829-844.

5.36 Coutts, R. S. P. "Air-Cured Pulp, Fiber/Cement Mortars," *Composites*, Vol. 18, No. 4, Sept. 1987, pp. 325-328.

5.37 Coutts, R. S. P., "Autoclaved Beaten Wood Fiber Reinforced Cement Composites," *Composites*, Vol. 15, No. 2, Apr. 1984, pp. 139-143.

5.38 Pederson, N., "Commercial Development of Alternatives to Asbestos Sheet Products Based on Short Fibers," *Fibrous Concrete*, Proceedings of the Symposium on Fibrous Concrete in London, Apr. 1980, The Concrete Society, Concrete International 1980, The Construction Press, Lancaster, London and New York, 1980, pp. 189-193.

5.39 CSIRO, "New—A Wood Fiber Cement Building Board," *CSIRO Industrial Research News* 146, Australia, May 1981.

5.40 Gram, H. E., "Durability Study of Natural Organic Fibres in Concrete, Mortar or Cement," RILEM Symposium FRC 86: *Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete*, Paper 7.2.

5.41 Sharman, W. R., and Vautier, B. P., "Durability Studies of Wood Fibre Reinforced Cement Sheet," RILEM Symposium FRC 86: *Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete*, Paper 7.2.

5.42 Coutts, R. S. P., "Fibre-Matrix Interface in Air Cured Wood-Pulp Fibre-Cement Composites," *Journal of Materials Science Letters*, Vol. 6, pp. 140-142.

5.43 Coutts, R. S. P., "Eucalyptus Wood Fibre Reinforced Cement," *Journal of Materials Science Letters*, 1987, pp. 955-957.

5.44 Studinka, J. B., "Asbestos Substitution in the Fibre Cement Industry," *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 11, No. 2, 1989, pp. 73-78.

5.45 Akers, S. A. S., and Studinka, J. B., "Ageing Behaviour of Cellulose Fibre Cement Composites in Natural Weathering and Accelerated Tests," *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 11, No. 2, 1989, pp.93-97.

5.46 Bentur, A., and Akers, S. A. S., "The Microstructure and Ageing of Cellulose Fibre Reinforced Cement Composites Cured in a Normal Environment," *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete,* Vol. 11, No. 2, 1989, pp. 99-109.

5.47 Bentur, A., Akers, S. A. S., "The Microstructure and Ageing of Cellulose Fibre Reinforced Autoclaved Cement Composites," *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 11, No. 2 1989, pp. 111-115.

5.48 Akers, S. A. S.; Crawford, D.; Schultes, K.; and Gerneka, D. A., "Micromechanical Studies of Fresh and Weathered Fibre Cement Composites, Part 1: Dry Testing," *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 11, No. 2, 1989, pp. 117-124.

5.49 Tait, R. B., and Akers, S. A. S., "Micromechanical Studies of Fresh and Weathered Fibre Cement Composites, Part 2: Wet Testing," *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 11, No. 2, 1989, pp. 125-131.

5.50 Coutts, R. S. P., and Ward, J. V., "Microstructure of Wood-Fibre-Plaster Composites," *Journal of Materials Science Letters*, 1987, pp. 562-564.